

HOCHSCHULE MITTWEIDA – UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Maschinenbau

Fachrichtung Stahl- und Metallbau

Bachelorarbeit

Mit dem Thema:

Bemessung und Nachweisführung einer Krananlage nach dem Berechnungskonzept des Eurocode an einem ausgewählten Beispiel

Eingereicht von: Marcus Gäbler

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Torsten Laufs

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Dieter Seidel

Roßwein, 2012

Marcus Gäbler:

Bemessung und Nachweisführung einer Krananlage nach dem Berechnungskonzept des Eurocode an einem ausgewählten Beispiel. - 2012. – 125 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences,

Fakultät Maschinenbau, Fachrichtung Stahl- und Metallbau,

Bachelorarbeit, 2012

Referat:

In dieser Arbeit soll die Bemessung und Nachweisführung einer Krananlage mit deren Fachwerkstützen nach europäischem Regelwerk aufgezeigt werden. Es werden zwei 20t Brückenkrane zur Anwendung kommen, welche vom Bauherrn vorgegeben wurden und somit für die Berechnungen ausschlaggebend sind. Unter den Gesichtspunkten der statischen Berechnung und der Werkstoffermüdung werden die maßgebenden Querschnitte sowie wichtigsten Anschlüsse des Kranbahnträgers und der Stützen nachgewiesen. Dabei kommen speziell der Eurocode 1 und der Eurocode 3 zur Anwendung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Allgemeines.....	1
1.2	Zielstellung der Arbeit.....	2
1.3	Abgrenzung.....	2
1.4	Allgemeine Angaben zum Eurocode	2
2	Algorithmus zur Nachweisführung Einfeldriger Kranbahnträger nach Eurocode...	4
3	Systembeschreibung	32
3.1	Allgemeine Beschreibung des vorhandenen Bauwerks	32
3.2	Allgemeine Beschreibung der neu zu errichtenden Konstruktion	33
3.3	Montageablauf der Unterstützungs konstruktion sowie der Kranbahnträger	33
4	Nachweis und Bemessung des Kranbahnträgers.....	34
4.1	allgemeine Angaben.....	34
4.1.1	Vorgaben des Bauherrn	34
4.1.2	Daten des einzubauenden Krans	34
4.2	Lastannahmen	36
4.2.1	Ermittlung der Radlasten.....	36
4.2.2	Vordimensionierung	37
4.2.3	Schwingbeiwerte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	38
4.2.4	Erstellen der Lastgruppen	42
4.2.4.1	charakteristische Werte der vertikalen Radlasten	42
4.2.4.2	charakteristische Werte der horizontalen Radlasten	45
4.3	Einwirkungskombinationen und Schnittgrößen infolge Kranüberfahrt	47
4.4	Allgemeine Querschnittswerte	48
4.5	Nachweis der Tragfähigkeit.....	50
4.5.1	Klassifizierung des Kranbahnträgerquerschnitts.....	50
4.5.2	Querschnittsnachweise des Kranbahnträgers	51
4.5.2.1	Nachweis für die Einwirkungskombination 1	51
4.5.2.2	Nachweis für die Einwirkungskombination 5	52
4.5.3	BDK-Nachweis als Querschnittsnachweis	54
4.6	Lokale Nachweise	57
4.6.1	Lasteinleitungsspannungen.....	57
4.6.2	Beulnachweis.....	59
4.6.2.1	Beulnachweis für einzelne Radlast	59
4.6.2.2	Beulnachweis für zwei nah beieinanderliegende Radlasten.....	60
4.7	Einzelnachweise	61
4.7.1	Nachweis der Schienenschweißnaht.....	61
4.7.2	Nachweis der Träger-Winkel Schweißnaht für das maximale Biegemoment ...	63
4.7.3	Nachweis der Stirnplattenschweißnaht.....	63
4.7.4	Nachweis der Schraubenverbindung Kranbahnträger-Stütze	65
4.7.5	Nachweis der Gewindestange zur Einleitung der Horizontalradlast	68
4.7.5.1	Nachweis der Gewindestange auf Zugversagen	68
4.7.5.2	Stabilitätsnachweis der Gewindestange.....	68
4.7.6	Nachweis des Endanschlags.....	69
4.8	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	70
4.8.1	vertikale Durchbiegung.....	70
4.8.2	horizontale Durchbiegung	71
4.8.3	Stegblechatmen	71
4.8.4	Untergurtschwingen	71
4.9	Ermüdungsnachweis.....	71
4.9.1	Allgemeine Festlegungen.....	71

4.9.2	Schwingbeiwerte und Radlasten	72
4.9.3	Nachweis der Ermüdung	73
4.9.3.1	Nachweis der Schienenoberkante	74
4.9.3.2	Normalspannungen an der Flanschunterkante	74
4.9.3.3	Lasteinleitungsspannung Schienenschweißnaht	74
4.9.3.4	Stegansatz im Feld	75
4.9.3.5	Nahtbereich des angeschweißten Winkelprofils	77
5	Nachweis und Bemessung der Stütze	78
5.1	Schwingbeiwerte	78
5.2	Lastannahmen	79
5.2.1	charakteristische Werte der vertikalen Radlasten	79
5.2.2	charakteristische Werte der horizontalen Radlasten	80
5.3	Schnittgrößen infolge Kranüberfahrt	80
5.3.1	Imperfektionen für die Stütze	80
5.3.2	Laststellungen für die maximalen Schnittgrößenermittlung	81
5.4	Nachweis der Tragfähigkeit	86
5.4.1	Klassifizierung des Stützenquerschnitts	86
5.4.2	Querschnittsnachweis der Stütze	86
5.4.2.1	Nachweis des Gurtstabs auf Zugbeanspruchung	86
5.4.2.2	Nachweis des Gurtstabs auf Druckbeanspruchung	87
5.4.2.3	Nachweis des Gitterstabs auf Zugbeanspruchung	87
5.4.2.4	Nachweis des Gitterstabs auf Druckbeanspruchung	87
5.4.3	Stabilitätsnachweis der Gitterstütze	88
5.4.3.1	Knicknachweis der Gurtstäbe	88
5.4.3.2	Knicknachweis des Gurtstabes unter der maximalen Schnittkraft	92
5.4.3.3	Knicknachweis der Gitterstäbe unter der maximalen Schnittkraft	93
5.4.4	Einzelnachweise	94
5.4.4.1	Nachweis der Schweißnaht des verlängerten Stützenarms	94
5.4.4.2	Nachweis der Schweißnaht des Gitterstabanschlusses	96
5.4.4.3	Nachweis des Stützenfuß	97
5.4.4.3.1	Übertragung der Kräfte von der Stütze in die Fußplatte	97
5.4.4.3.2	Übertragung der Kräfte in das Fundament	100
5.5	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	103
6	Nachweis und Bemessung des Bremsverbandes	104
6.1	Querschnittsnachweis der Verbandstäbe	105
6.1.1	Zugbeanspruchung	105
6.1.2	Druckbeanspruchung	107
6.2	Stabilitätsnachweise der Verbandstäbe	107
6.2.1	Verbandstab 2	107
6.2.2	Verbandstab 5	108
6.2.3	Verbandstab 7	108
6.3	Einzelnachweise	109
6.3.1	Nachweis Knoten A	109
6.3.1.1	Nachweis der Schweißnaht des Knotenblechs	110
6.3.1.2	Nachweis des Knotenblech auf Herausreißen	110
6.3.2	Nachweis Knoten H	111
6.3.2.1	Nachweis der Schweißnaht des Knotenblechs	111
6.3.2.2	Nachweis des Knotenblechs neben der Naht	112
6.3.2.3	Nachweis der Schraubenverbindung	112
6.3.2.4	Nachweis des Knotenblech auf Herausreißen	115
7	Zusammenfassung	116
8	Literaturverzeichnis / Quellen	117

8.1	Normen	117
8.2	Literatur	117
8.3	Software	117
9	Eidesstattliche Erklärung	118

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}	16
Abbildung 2: Ausbreitung der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} unter 45°	17
Abbildung 3: Länge der starren Lasteinleitung.....	21
Abbildung 4: typische Kerbfälle	30
Abbildung 5: Kranbahn mit Stahlbetonstützen (Bestand).....	32
Abbildung 6: Übersicht Doppelbrückenkran, Datenblatt.....	35
Abbildung 7: Kranbahnträgerquerschnitt	37
Abbildung 8: Systemdarstellung von zwei KBT mit Kranüberfahrt in einer Achse	38
Abbildung 9: charakteristische Lasten der Lastgruppe 1.....	46
Abbildung 10: charakteristische Lasten der Lastgruppe 5.....	46
Abbildung 11: Querschnitt des Kranbahnträgers	48
Abbildung 12: c/t-Verhältnisse des Kranbahnträgers	50
Abbildung 13: maßgebende Spannungspunkte	51
Abbildung 14: Momentendarstellung für die EK1	55
Abbildung 15: Momentendarstellung für die EK5	56
Abbildung 16: effektiver Obergurt für die Berechnung der Lasteinleitungsbreite	58
Abbildung 17: Lastangriffslänge Oberkante Obergurt	61
Abbildung 18: Randabstände bei Langlöchern	66
Abbildung 19: Stirnansicht des Kranbahnträgers	67
Abbildung 20: graphische Darstellung des Endanschlags	69
Abbildung 21: charakteristische Radlasten für den Ermüdungsnachweis	73
Abbildung 22: Nachweisstellen und Kerbfälle	73
Abbildung 23: grafische Darstellung einer Kranbahnachse.....	78
Abbildung 24: grafische Darstellung einer Stütze	81
Abbildung 25: maßgebende Laststellung 1.....	82
Abbildung 26: maßgebende Laststellung 2.....	83
Abbildung 27: maßgebende Laststellung 3.....	84
Abbildung 28: maßgebende Laststellung 4.....	85
Abbildung 29: Schubsteifigkeit von Gitterstützen infolge der Verformung der Gitterstütze	89
Abbildung 30: Querschnitt der Fachwerkstütze.....	89
Abbildung 31: Ansicht der Fachwerkstütze	90
Abbildung 32: An- und Draufsicht der Stütze mit Kranbahnträger.....	94
Abbildung 33: Abmessungen der Systemlinien der Stütze.....	96
Abbildung 34: Stützenfuß	97
Abbildung 35: Biegemoment in der Fußplatte	99
Abbildung 36: grafische Darstellung des Bremsverbandes	104
Abbildung 37: grafische Darstellung des Bremsverbandes	104
Abbildung 38: Nummerierung der Stäbe und Knoten im Bremsverband	105
Abbildung 39: einseitig angeschlossen Winkel	106
Abbildung 40: grafische Darstellung des Knoten A	109
Abbildung 41: grafische Darstellung des Knoten H	111
Abbildung 42: Bezeichnungen der Lochabstände.....	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Empfehlung für die Beanspruchungsklasse	4
Tabelle 2: Schwingbeiwerte nach EC 1-3	5
Tabelle 3: Empfehlung für die maximale Anzahl von Kranen in ungünstigster Stellung	6
Tabelle 4: Teilsicherheitsbeiwerte nach EC 1-3 und EC 3-6	7
Tabelle 5: Kombinationsbeiwerte nach EC 1-3	7
Tabelle 6: Lastgruppen mit dynamischen Faktoren	8
Tabelle 7: Empfehlung für γ_{Mf} - Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit.....	10
Tabelle 8: maximales c/t - Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile.....	11
Tabelle 9: Wirksame Schubfläche A_v bei plastischer Querschnittstragfähigkeit.....	14
Tabelle 10: Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}	16
Tabelle 11: Auswahl der Knicklinie eines Querschnitts	18
Tabelle 12: Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien	19
Tabelle 13: Vorkrümmung e_0	20
Tabelle 14: Grenzwerte für vertikale Verformungen.....	24
Tabelle 15: Grenzwerte für horizontale Verformungen.....	25
Tabelle 16: Grenzwerte für Verformung.....	26
Tabelle 17: Klassifizierung der Ermüdungseinwirkungen von Kranen nach EN 13001-1	28
Tabelle 18: λ_i – Werte entsprechend der Kranklassifizierung	29
Tabelle 19: dynamische Faktoren φ_i	38
Tabelle 20: dynamische Faktoren φ_i für vertikale Lasten	39
Tabelle 21: Werte für β_2 und $\varphi_{2,min}$	39
Tabelle 22: dynamischer Faktor φ_5	40
Tabelle 23: Faktor φ_7	40
Tabelle 24: Lastgruppen mit dynamischen Faktoren	42
Tabelle 25: empfohlene Werte für γ -Faktoren	47
Tabelle 26: Minima und Maxima der Schnittkräfte bei verschiedenen Laststellungen.....	47
Tabelle 27: Minima und Maxima der Schnittkräfte bei verschiedenen Laststellungen.....	48
Tabelle 28: Querschnittswerte des Kranbahnträgers	49
Tabelle 29: c/t - Verhältnisse des Kranbahnträgers.....	50
Tabelle 30: Bemessung der Vorkrümmung e_0/L von Bauteilen.....	54
Tabelle 31: Korrelationsbeiwerte β_w für Kehlnähte.....	62
Tabelle 32: Kategorien von Schraubenverbindungen	65
Tabelle 33: Nennwerte der Streckgrenze f_{yb} und der Zugfestigkeit f_{ub} von Schrauben	65
Tabelle 34: Grenzwerte für Rand- und Lochabstände	66
Tabelle 35: einwirkende Kräfte im Lager	98
Tabelle 36: Schnittkräfte der Stäbe im Bremsverband.....	105
Tabelle 37: Abminderungsbeiwerte β_2 und β_3	106

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Krananlagen dienen im Allgemeinen dem vertikalen und horizontalen Transport schwerer Lasten und sind aus dem heutigen Industriezeitalter nicht mehr wegzudenken. Speziell die Brückenlaufkrane, welche oft in Lager- bzw. Produktionshallen, aber auch als Außenanlagen zu finden sind, transportieren schwere aber auch lange Güter punktgenau an ihren Bestimmungsort innerhalb des Arbeitsbereiches der Krananlage. Diese Art Brückenlaufkran besteht aus einem oder zwei Brückenträgern, zwei Kopfträgern und der Katze mit dem Hebezeug. Er fährt auf Schienen, welche oben auf dem Kranbahnträger aufgebracht sind. Der Querschnitt der Kranbrücke kann aus einem Walzprofil, einem I-Schweißprofil oder einem Kastenträger bestehen. Die Hersteller solcher Brückenlaufkrane bieten eine breite Produktpalette in Sachen Brückenbauform, Brückenspannweite sowie Traglast und Anschlagmöglichkeiten. Es wird dabei im wesentlichen zwischen Einträger- und Zweiträger-Brückenlaufkranen unterschieden, welche für Traglasten von einer Tonne bis hin zu über 100 Tonnen, bewerkstelligen können. Dabei sind Spannweiten bis zu 30 Meter keine Seltenheit und liegen im Standardangebot der Kranhersteller. Durch die hohen Anforderungen an Qualität und Maßhaltigkeit, welche an den Kranhersteller aber auch den Stahlbauer, der die Kranbahn in den vorgegebenen Toleranzen fertigt und montiert, gestellt werden, kann ein Verschleißarmer Betrieb einer Krananlage über Jahre hin gewährleistet werden.

Eine Kranbahn besteht zum einen aus den Kranbahnträgern, welche aus gewalzten oder geschweißten I-Querschnitten aber auch aus geschweißten Kastenquerschnitten bestehen können. Sie sind meist einfache statische Systeme (Ein-, Zwei- oder Mehrfeldträger). Der Kranbahnträger an sich ist jedoch ein besonderes Tragwerk, welches sich von den im Stahlhochbau üblichen Bauwerken unterscheiden. Zum einen sind sie durch die Überfahrt der Kranbrücke „nicht vorwiegend ruhend“ beansprucht, was ein Ermüdungsproblem entstehen lässt, welches nachgewiesen werden muss. Desweiteren sind komplexe Stabilitätsprobleme, beispielsweise das Stegbeulen unter Berücksichtigung von Querlasten, oder Biegedrillknicken in Verbindung mit planmäßig vorhandener Torsion zu untersuchen und nachzuweisen. Letztlich folgen die hohen Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit von Krananlagen, welche wesentlich höher sind als üblichen im Stahlhochbau. Desweiteren gehört die Unterkonstruktion mit den Stützen und den Verbänden zu einer solchen Anlage. Die Stützen, welche sowohl aus Stahl aber auch aus Stahlbeton gefertigt werden können, sind gegeben falls Hauptbestandteil des Hallentragwerks, an denen die Kranbahnträger über Konsolen angeschlossen werden.

1.2 Zielstellung der Arbeit

Ausgangspunkt der Arbeit ist eine vorhandene jedoch nicht mehr traglastausreichende Krananlage in der Konservierungshalle der Stahl- und Brückenbau Niesky GmbH. Die Zielstellung ist somit die Planung, Bemessung und Konstruktion einer neuen Krananlage in dieser Halle unter den Vorgaben des Bauherren. Da keine statischen Unterlagen für den bestehenden Bau mehr vorliegen und somit keine Aussage über die Beanspruchbarkeit der vorhandenen Stahlbetonstützen sowie deren Konsolen getroffen werden kann, wird die neue Krananlage als einzelnes Tragwerk in die Halle integriert. Dadurch wird das bestehende Hallentragwerk von der Beanspruchung durch den Kranbetrieb vollständig freigestellt.

Dies erfolgt durch Erläuterung zur Berechnung der Kräfte infolge des Kranbetriebs sowie die Nachweisführung der Kranbahnträger und deren Unterkonstruktion nach dem Berechnungskonzept des Eurocode.

1.3 Abgrenzung

Die neu zu errichtende Krananlage, welche mit zwei Brückenkränen, einer vorgegebenen Traglast von jeweils 20 t und einer Kranbrückenspannweite von 22 Metern angegeben ist, soll so konstruiert werden, dass unter den Bedingungen des Sicherheitskonzepts des Eurocode ein möglichst materialwirtschaftliches und kostengünstiges Tragwerk entsteht. Für die gesamte Konstruktion wird aus Gründen der Eigenfertigung auf Walzprofile in der Stahlsorte S235 zurückgegriffen.

Für die Berechnung der Kräfte infolge des Kranbetriebs wird die DIN EN 1991-3 (EC1-3) und das Krاندatenblatt des Herstellers DEMAG herangezogen. Für die Nachweisführung des Kranbahnträgers, dessen Ermüdungsnachweis, sowie der gesamten Unterkonstruktion wird auf den Eurocode 3 verwiesen.

1.4 Allgemeine Angaben zum Eurocode

Die Eurocodes (EC) sind europaweit vereinheitlichte Bemessungs- und Konstruktionsnormen für die Tragwerksplanung. Diese Europäischen Normen (EN) wurden durch das CEN (European Committee for Standardization) erarbeitet.

Die Geschichte des Eurocodes begann bereits im Jahre 1975, als die Europäische Kommission ein Programm zur Beseitigung von Handelshemmnissen im Baubereich beschlossen hat. Somit entstanden in den 1980er Jahren die ersten Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau. Die Aufgaben der Europäischen Kommission wurden im Jahr 1989 an das CEN übergeben. Diese Normungsorganisation brachte zunächst sogenannte

Europäische Vornormen (ENV) probeweise zur Anwendung heraus. Seit 1997 werden diese Vornormen in Europäische Normen (EN) überführt.

Ab dem 1. Juli 2012 werden die Eurocodes in Deutschland bauaufsichtlich eingeführt. Sie lösen somit die in Deutschland, im Bereich Bauwesen, bisher gültigen DIN-Normen ab. D.h. alle Tragwerksplaner und die an der Planung Beteiligten müssen ab diesem Zeitpunkt, ohne Übergangsfrist, die neuen Normen verbindlich anwenden.

Auf Grund der wachsenden Globalisierung war ein solches internationales Regelwerk notwendig geworden, welches folgende Vorteile mit sich bringen soll:

- Europaweit einheitliche Entwurfskriterien
- Harmonisierung national unterschiedlicher Regeln
- Einheitliche Basis für Forschung und Entwicklung
- Einheitlicher Austausch von Dienstleistungen und Produkten im Bauwesen
- Einfachere europaweite Ausschreibungen von Bauleistungen

Die Eurocodes sind ein Sammelwerk von derzeit zehn europäischen Normen:

- | | |
|----------------------------|--|
| - DIN EN 1990, Eurocode 0: | Grundlagen der Tragwerksplanung |
| - DIN EN 1991, Eurocode 1: | Einwirkungen auf Tragwerke |
| - DIN EN 1992, Eurocode 2: | Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken |
| - DIN EN 1993, Eurocode 3: | Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten |
| - DIN EN 1994, Eurocode 4: | Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton |
| - DIN EN 1995, Eurocode 5: | Bemessung und Konstruktion von Holzbauten |
| - DIN EN 1996, Eurocode 6: | Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten |
| - DIN EN 1997, Eurocode 7: | Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik |
| - DIN EN 1998, Eurocode 8: | Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben |
| - DIN EN 1999, Eurocode 9: | Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen |

Diese einzelnen Eurocodes sind weiterhin mehrfach untergliedert und haben zusätzlich zu jedem Land, welches diese neuen Normen einführt, Nationale Anhänge bereitgestellt. In denen wiederum werden vor allem die national festzulegenden Parameter, wie z.B. Teilsicherheitsbeiwerte, definiert.

2 Algorithmus zur Nachweisführung Einfeldriger Kranbahnträger nach Eurocode (für Deutschland) in Anlehnung an die Theorie von [9]

1. Einstufung des Krans in die Hubklasse und die Beanspruchungsklasse



Tabelle 1: Empfehlung für die Beanspruchungsklasse, EC 1-3, Tab. B.1, siehe [3], Anhang B

Zeile	Art des Krans	Hubklasse	S-Klasse
1	Handbetriebene Kräne	HC 1	S0, S1
2	Montagekräne	HC1, HC2	S0, S1
3	Maschinenhauskräne	HC1	S1, S2
4	Lagerkräne – mit diskontinuierlichem Betrieb	HC2	S4
5	Lagerkräne, Traversenkräne, Schrottplatzkräne – mit kontinuierlichem Betrieb	HC3, HC4	S6, S7
6	Werkstattkräne	HC2, HC3	S3, S4
7	Brückenlaufkräne, Anschlagkräne – mit Greifer- oder Magnetarbeitsweise	HC3, HC4	S6, S7
8	Gießereikräne	HC2, HC3	S6, S7
9	Tiefenkräne	HC3, HC4	S7, S8
10	Stripperkräne, Beschickungskräne	HC4	S8, S9
11	Schmiedekräne	HC4	S6, S7
12	Transportbrücken, Halbportalkräne, Portalkräne mit Katz oder Drehkran – mit Lasthakenarbeitsweise	HC2	S4, S5
13	Transportbrücken, Halbportalkräne, Portalkräne mit Katz oder Drehkran – mit Greifer- oder Magnetarbeitsweise	HC3, HC4	S6, S7
14	Förderbandbrücke mit festem oder gleitendem Förderband	HC1	S3, S4
15	Werftkräne, Hellingkräne, Ausrüstungskräne – mit Lasthakenarbeitsweise	HC2	S3, S4
16	Hafenkräne, Drehkräne, Schwimmkräne, Wippdrehkräne – mit Lasthakenarbeitsweise	HC2	S4, S5
17	Hafenkräne, Drehkräne, Schwimmkräne, Wippdrehkräne – mit Greifer- oder Magnetarbeitsweise	HC3, HC4	S6, S7
18	Schwerlastschwimmkräne, Bockkräne	HC1	S1, S2
19	Frachtschiffkräne – mit Lasthakenarbeitsweise	HC2	S3, S4
20	Frachtschiffkräne – mit Greifer- oder Magnetarbeitsweise	HC3, HC4	S4, S5
21	Turmdrehkräne für die Bauindustrie	HC1	S2, S3
22	Montagekräne, Derrickkräne – mit Lasthakenarbeitsweise	HC1, HC2	S1, S2
23	Schienenendrehkräne – mit Lasthakenarbeitsweise	HC2	S3, S4
24	Schienenendrehkräne – mit Greifer- oder Magnetarbeitsweise	HC3, HC4	S4, S5
25	Eisenbahnkräne zugelassen auf Züge	HC2	S4
26	Autokräne, Mobilkräne – mit Lasthakenarbeitsweise	HC2	S3, S4
27	Autokräne, Mobilkräne – mit Greifer- oder Magnetarbeitsweise	HC3, HC4	S4, S5
28	Schwerlastautokräne, Schwerlastmobilkräne	HC1	S1, S2

2. Bestimmung der Schwingbeiwerte nach EC 1-3



Tabelle 2: Schwingbeiwerte nach EC 1-3, siehe [3], Kap.2

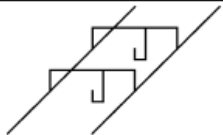
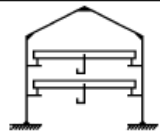
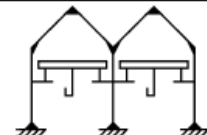
φ_i	Einfluss, der berücksichtigt wird	Anzuwenden auf	Definition der Schwingbeiwerte															
φ_1	Schwingungsanregung des Krantragwerkes infolge Anheben der Hublast vom Boden	Eigengewicht des Krans	$0,9 \leq \varphi_1 \leq 1,1$ Die beiden Werte 1,1 und 0,9 decken die unteren und oberen Werte des Schwingimpulses ab.															
φ_2	Dynamische Wirkungen beim Anheben der Hublast vom Boden	Hublast	$\varphi_2 = \varphi_{2,max} + \beta_2 \cdot v_H$ v_H - konstante Hubgeschwindigkeit in [m/s] <table><tr><th>Hubklasse</th><th>β_2</th><th>$\varphi_{2,max}$</th></tr><tr><td>HC 1</td><td>0,17</td><td>1,05</td></tr><tr><td>HC 2</td><td>0,34</td><td>1,10</td></tr><tr><td>HC 3</td><td>0,51</td><td>1,15</td></tr><tr><td>HC 4</td><td>0,68</td><td>1,20</td></tr></table>	Hubklasse	β_2	$\varphi_{2,max}$	HC 1	0,17	1,05	HC 2	0,34	1,10	HC 3	0,51	1,15	HC 4	0,68	1,20
Hubklasse	β_2	$\varphi_{2,max}$																
HC 1	0,17	1,05																
HC 2	0,34	1,10																
HC 3	0,51	1,15																
HC 4	0,68	1,20																
φ_3	Dynamische Wirkungen durch plötzliches Loslassen der Nutzlast bei Verwendung von Greifern oder Magneten	Hublast	$\varphi_3 = 1 + \frac{\Delta m}{m} \cdot (1 + \beta_3)$ m Masse der gesamten Hublast Δm der losgelassenen oder abgesetzte Teil der Masse der Hublast $\beta_3 = 0,5$ bei Kranen mit Greifern oder ähnlichen Vorrichtungen für langsames Absetzen $\beta_3 = 1,0$ bei Kranen mit Magneten oder ähnlichen Vorrichtungen für schnelles Absetzen															
φ_4	Dynamische Wirkungen hervorgerufen durch Fahren auf Schienen oder Fahrbahnen	Eigengewicht von Kran und Hublast	$\varphi_4 = 1,0$ vorausgesetzt, dass die in EC 3-6 festgelegten Toleranzen für Kranschienen eingehalten werden															
φ_5	Dynamische Wirkungen verursacht durch Antriebskräfte	Antriebskräfte	$\varphi_5 = 1,0$ für Fliehkräfte $1,5 \leq \varphi_5 \leq 1,8$ Systeme mit stetiger Veränderung der Kräfte $1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$ wenn plötzliche Veränderungen der Kräfte auftreten $\varphi_5 = 3,0$ bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel															
φ_6	Dynamische Wirkungen infolge einer Prüflast, die durch die Antriebe entsprechend den Einsatzbedingungen bewegt wird	Dynamische Prüflast 110%	$\varphi_6 = 0,5 \cdot (1 + \varphi_2)$															
φ_7	Dynamische, elastische Wirkungen verursacht durch Pufferanprall	Pufferkräfte	$\varphi_7 = 1,25$ für $0 \leq \xi \leq 0,5$ $\varphi_7 = 1,25 + 0,7 \cdot (\xi - 0,5)$ für $0,5 \leq \xi \leq 1,0$ ξ Abhängig von der Pufferkennlinie (siehe [3], Kap. 2.11.1)															

Hinweis:

Für die Bemessung und Nachweisführung der Unterstützungs- und Aufhängungskonstruktion der Krananlage, welche die Lasten ins Fundament einleiten, bietet der Eurocode die Möglichkeit sämtliche Schwingbeiwerte $\varphi > 1,1$, um $\Delta\varphi = 0,1$ zu reduzieren. Der Nachweis der Fundamente darf ohne Schwingbeiwerte geführt werden.

Berücksichtigung von mehreren Kranen

Tabelle 3: Empfehlung für die maximale Anzahl von Kranen in ungünstigster Stellung, EC 1-3, Tab. 2.3, siehe [3], Kap. 2.5.3

	Krane je Kranbahn	Krane je Hallenschiff	Krane in mehrschiffigen Hallen	
				
Vertikale Kraneinwirkung	3	4	4	2
Horizontale Kraneinwirkung	2	2	2	2

Hinweise:

Für die Betrachtung eines Zweiten und/oder weiterer Krane darf der Schwingbeiwert der Hubklasse HC1 angesetzt werden.

Krane, die in erheblichem Maße zusammen arbeiten, um besonders schwere oder große Lasten zu transportieren, sollen zusammen als ein einziger Kran behandelt werden.

3. Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte



Teilsicherheitsbeiwerte:

Tabelle 4: Teilsicherheitsbeiwerte nach EC 1-3 und EC 3-6, siehe [3] Anhang A, [8] Kap. 2.8 und NA

Einwirkungen (ungünstig wirkend)	Teilsicherheitsbeiwerte	
	Ständig und Vorübergehende Bemessungssituationen	Außergewöhnliche Bemessungssituationen
... aus Kranen, EK GZT	$\gamma_Q = 1,35$	$\gamma_A = 1,0$
... aus Kranprüflast, EK GZT	$\gamma_{F,Test} = 1,1$	$\gamma_A = 1,0$
... aus Kranen, EK GZG	$\gamma_{Q,ser} = 1,0$	-
... aus Kranen, EK Ermüdung	$\gamma_{Ef} = 1,0$	-

Kombinationsbeiwerte:

Tabelle 5: Kombinationsbeiwerte nach EC 1-3, Tab. NA.A.2, siehe [3], Anhang A

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
...aus Kranen	1,0	0,9	a
ψ_0	für alle ständigen und veränderlichen Einwirkungskombinationen		
ψ_1	für außergewöhnliche Einwirkungskombinationen (vorherrschend veränderliche Einwirkung)		
ψ_2	für außergewöhnliche Einwirkungskombinationen (alle restlichen veränderliche Einwirkung)		
a	$a = \frac{\text{Krangewicht}}{\text{Krangewicht} + \text{Hublast}}$		

4. Lastgruppen zur Bemessung des Kranbahnträgers



Tabelle 6: Lastgruppen mit dynamischen Faktoren, EC 1-3, Tab. 2.2, siehe [3] , Kap. 2.2.2

Belastung	Bezeichnung nach EC 1-3	Lastgruppen für Einwirkungskombinationen im GZT, im GZG und im Grenzzustand der Ermüdung													
	Symbol	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit							GZT, Prüflast	GZT, außergewöhnlich		GZG			Ermüdung
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Eigengewicht des Krans	Q_C	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1	1	1	1	$\varphi_{fat,1}$
Hublast	Q_H	φ_2	φ_2	-	φ_4	φ_4	φ_4	η	-	1	1	1	1	1	$\varphi_{fat,2}$
Anfahren/ Bremsen der Kranbrücke	H_L H_T	φ_3	φ_3	φ_3	φ_5	-	-	-	φ_3	-	-	-	-	1	-
Schräglauf der Kranbrücke	H_F	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-
Anfahren/ Bremsen der Laufkatze oder des Hubwerks	$H_{T,3}$	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Wind in Betrieb	F_W^*	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-	-	1	1	-
Kranprüflast	Q_T	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-	-	-	-	-
Pufferkraft	H_E	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-	-	-	-	-
Kippkraft	H_{TA}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
η ist der Anteil der Hublast, der nach Entfernen der Nutzlast verbleibt, jedoch nicht im Eigengewicht des Krans enthalten ist															

Hinweis:

- Die Einwirkungen auf den Kranbahnträger werden im wesentlichen in vertikal, veränderliche und horizontal, veränderliche Lasten eingeteilt. Dabei geben in den meisten Fällen die Datenblätter der Kranhersteller Auskunft über die zur Berechnung notwendigen Radlasten des zum Einsatz kommenden Krans.
- Es werden für die vertikalen Radlasten grundsätzlich eine Radlastexzentrizität von $b_r/4$ festgelegt. Es können jedoch auch Ersatzimperfektionen angesetzt werden, welche nicht mit der Radlastexzentrizität kombiniert werden muss. D.h. bei Ansatz von Ersatzimperfektionen, darf die Radlast als zentrisch angenommen werden.

4.1 Einwirkungskombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

a) ständige und vorübergehende Bemessungssituation:

$$\text{EK: } 1,35 * \text{Eigengewicht Kranbahnträger} + 1,35 * \text{Lastgruppe}(1 - 8)$$

b) außergewöhnliche Bemessungssituation

$$\text{EK: } 1,0 * \text{Eigengewicht Kranbahnträger} + 1,0 * \text{Lastgruppe}(9,10)$$

Diese Einwirkungskombinationen gelten in den meisten Fällen, d.h. wenn keine anderen Lasten wirken außer das Eigengewicht und eine Kranlastgruppe

4.2 Einwirkungskombinationen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

a) charakteristische (seltene) Einwirkungskombination:

$$\text{EK: } 1,0 * \text{Eigengewicht Kranbahnträger} + 1,0 * \text{Lastgruppe}(11 - 13)$$

Gilt nur bei nicht umkehrbaren Auswirkungen (z.B. Verschleiß).

b) häufige Einwirkungskombination:

$$\text{EK: } 1,0 * \text{Eigengewicht Kranbahnträger} + \psi_1 * 1,0 * \text{Lastgruppe}(11 - 13)$$

Gilt nur bei umkehrbaren Auswirkungen.

Diese Einwirkungskombinationen gelten nur falls keine weiteren Einwirkungen zu berücksichtigen sind.

4.3 Einwirkungskombinationen für den Ermüdungsnachweis

Für den Ermüdungsnachweis in den Beanspruchungsklassen S_4 bis S_9 ist eine Exzentrizität des vertikalen Radlastangriffs von $\frac{1}{4}$ der Schienenkopfbreite anzusetzen und die daraus resultierende Stegblechbiegung zu berücksichtigen. In den Beanspruchungsklassen S_0 bis S_3 darf darauf verzichtet werden.

Horizontale Lasten werden in den meisten Fällen nicht berücksichtigt. Falls jedoch regelmäßig in bestimmten Bereichen Beschleunigt bzw. Abgebremst wird, sollten Horizontallasten in den Ermüdungsnachweis einbezogen werden.

$$\text{EK: } \gamma_{Ff} * (\varphi_{fat,1} * \text{Eigengewicht Kranbrücke} + \varphi_{fat,2} * \text{Hublast})$$

mit: $\gamma_{Ff} = 1,0$ siehe NA EC 3-6

Im Regelfall kann auf die Berücksichtigung des Eigengewichts der Kranbahn verzichtet werden, da i.d.R. hierbei die Spannungsschwingbreiten maßgebend werden, worauf das Eigengewicht keinen Einfluss hat.

5. Teilsicherheitsbeiwerte der Widerstandseite

Grenzzustand der Tragfähigkeit:

- Nachweis gegen Fließen: $\gamma_{M0} = 1,0$
- Nachweis gegen Stabilitätsversagen: $\gamma_{M1} = 1,0$
- Nachweis von Verbindungen (Schrauben, Schweißnähte,...): $\gamma_{M2} = 1,25$

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

- $\gamma_{M,ser} = 1,0$

Ermüdung:

- $\gamma_{Mf} = 1,15$ im Regelfall (für: Konzept der Schadenstoleranz mit hoher Schadensfolge)

Tabelle 7: Empfehlung für γ_{Mf} - Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit, EC3-1-9 ,Tab.3.1, siehe [7], Kap.3

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

6. Grenzzustand der Tragfähigkeit

6.1 Querschnittsnachweise

6.1.1 Einteilung des Kranbahnträgerquerschnitts in die Querschnittsklassen

Tabelle 8: maximales c/t - Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile, EC3-1-1, Tab. 5.2, siehe [4], Kap. 5.6

Beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile						
				Biegeachse		
Klasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile			
1						
	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
3						
	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	für $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ für $\psi \leq -1^a$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		f_y	235	275	355	420
		ε	1,00	0,92	0,81	0,75
					460	0,71

^a Es gilt $\psi \leq -1$ falls entweder die Druckspannungen $\sigma \leq f_y$ oder die Dehnungen infolge Zug $\varepsilon_y > \frac{f_t}{E}$ sind.

Tabelle 8 (fortgesetzt): Maximales c/t - Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile, EC3-1-1, Tab. 5.2, siehe [4], Kap. 5.6


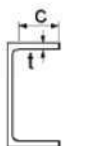
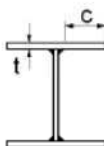
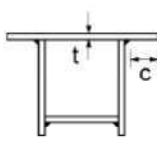
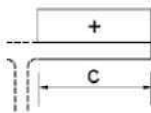
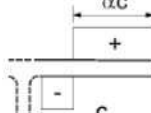
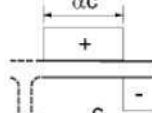
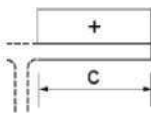
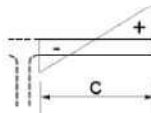
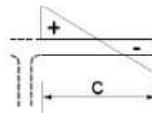
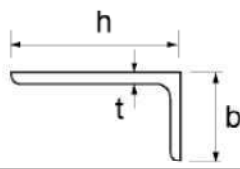
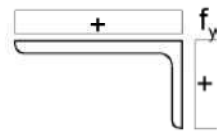
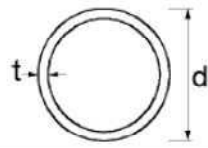
Einseitig gestützte Flansche							
							
Gewalzte Querschnitte			Geschweißte Querschnitte				
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile					
		freier Rand im Druckbereich		freier Rand im Zugbereich			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)							
1	$clt \leq 9\varepsilon$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$clt \leq 10\varepsilon$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)							
3	$clt \leq 14\varepsilon$	$clt \leq 21\varepsilon \sqrt{k_\sigma}$					
		Für k_σ siehe EN 1993-1-5					
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$		f_y	235	275	355	420	460
		ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Tabelle 8 (fortgesetzt): Maximales c/t - Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile, EC3-1-1, Tab. 5.2, siehe [4], Kap. 5.6

<div>Winkel</div> <div></div> <div>Siehe auch „einseitig gestützte Flansche“ in Tabelle 5.2, oben</div> <div>gilt nicht für Winkel mit durchgehender Verbindung zu anderen Bauteilen</div>							
Klasse		auf Druck beanspruchte Querschnittsteile					
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)		<div></div>					
3		$h/t \leq 15\varepsilon$ AC und AC $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
<div>Runde Hohlquerschnitte</div> <div></div>							
Klasse		auf Biegung und/oder Druck beanspruchte Querschnittsteile					
1		$d/t \leq 50\varepsilon^2$					
2		$d/t \leq 70\varepsilon^2$					
3		$d/t \leq 90\varepsilon^2$					
ANMERKUNG Für $d/t > 90\varepsilon^2$ siehe EN 1993-1-6.							
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		f_y	235	275	355	420	460
		ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
		ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Hinweise:

- Querschnitte der Klasse 4 finden üblicherweise keine Verwendung als Kranbahnträger, da diese keinerlei Rotationsvermögen aufweisen und somit unterhalb der Fließgrenze infolge Beulen versagen.
- Starr mit dem Flansch verbundenen Schienen dürfen als statisch mittragend angesehen werden, jedoch sind 25% Abnutzung des Schienenkopfes zu berücksichtigen. Für den Nachweis der Ermüdung ist eine Abnutzung des Schienenkopfes von 12,5% zu berücksichtigen.

6.1.2 Querschnittsnachweis für Biegemomente

Nachweisformel für I-Profile der Querschnittsklasse 1 und 2:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right)^2 + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} + \frac{M_{w,Ed}}{M_{pl,w,Rd}} \leq 1,0$$

Die vollplastischen Schnittgrößen können hierbei ohne die Begrenzung von $\alpha_{pl} = 1,25$ wie folgt bestimmt werden: $M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$; $M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$

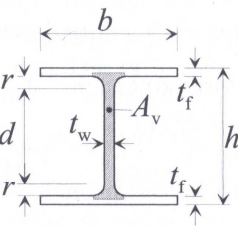
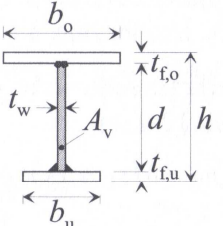
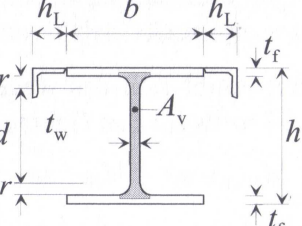
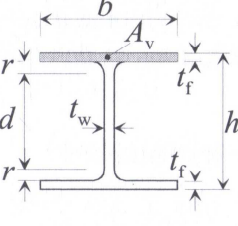
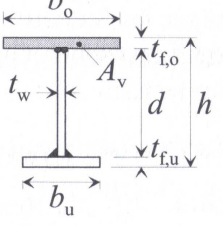
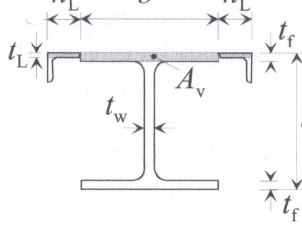
Für Querschnitte der Klasse 3 ist der Nachweis gegen die elastischen Grenzmomente zu führen.

6.1.3 Querkraftnachweis

Nachweisformel für die Querschnittsklassen 1 und 2:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Tabelle 9: Wirksame Schubfläche A_v bei plastischer Querschnittstragfähigkeit, EC 3-1-1, Kap. 6.2.6 (3), siehe [9], Kap. 12.2.3

Vertikale Lasten		
 $A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f$	 $d \cdot t_w$	 $A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f$
Horizontale Lasten:		
 $b \cdot t_f$	 $b_o \cdot t_{f,o}$	 $b \cdot t_f + 2 \cdot h_L \cdot t_L$

6.2 Lokale Nachweise

Für I-Profile ohne Ausrundungsradius (z.B. Schweißprofil) ergeben sich die Spannungen im Stegansatz an der Flanschunterkante:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,d}}{t_w * l_{eff}}$$

Für Walzprofile mit dem Ausrundungsradius r ergeben sich die Stegspannungen am Ende der Ausrundung:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,d}}{t_w * (l_{eff} + 2 * r)}$$

Dabei ist:

$F_{z,d}$ Bemessungswert der maximalen vertikalen Radlast

t_w Stegdicke

l_{eff} Lastausbreitungslänge, welche in drei Fällen unterschiedlich berechnet wird:

Tabelle 10: Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff} , EC 3-6, Tab. 5.1, siehe [8], Kap. 5.7.1

Fall	Beschreibung	Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}
(a)	Kranschiene schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [I_{ff} / t_w]^{1/3}$
(b)	Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$
(c)	Kranschiene auf einer mind. 6mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage	$l_{eff} = 4,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$

I_{rf} Trägheitsmoment um die horizontale Schwerachse des zusammen gesetzten Querschnitts einschließlich der Schiene und des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}

I_r Eigenträgheitsmoment der Schiene um ihre horizontale Schwerachse

$I_{f,eff}$ Eigenträgheitsmoment des Oberflansches um seine horizontale Schwerachse mit der effektiven Breite b_{eff}

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f \leq b$$

mit: b_{fr} Breite des Schienenfußes

h_r Höhe der abgenutzten Schiene (GZT: Abnutzung 25%; Ermüdung: Abnutzung: 12,5%)

t_f Flanschdicke

b Gesamtbreite des Obergurtes

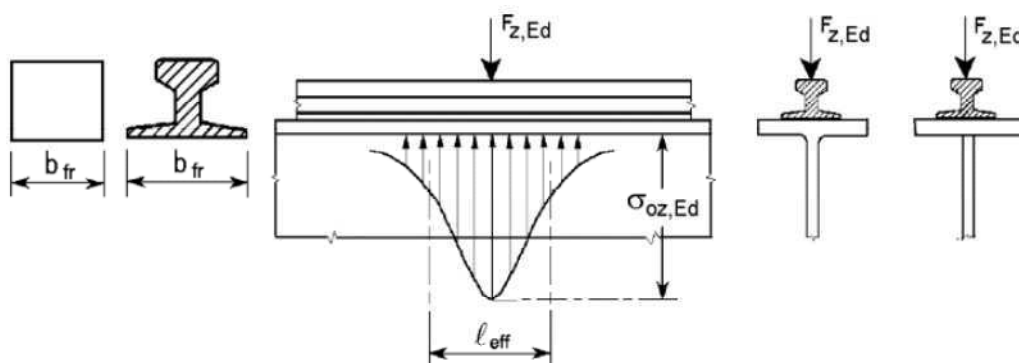


Abbildung 1: Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff} , EC 3-6, Bild 5.2, siehe [8], Kap. 5.7.1

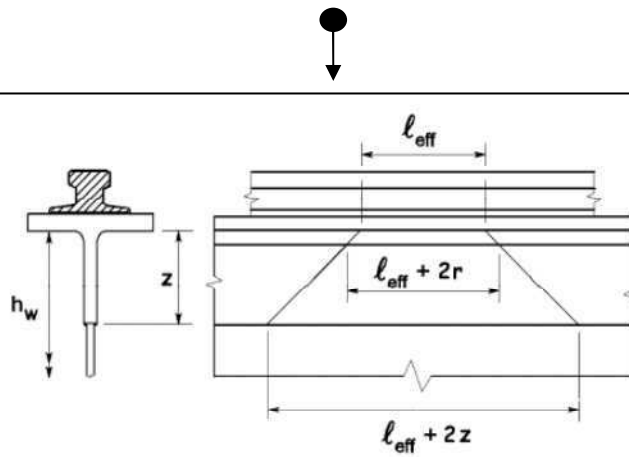


Abbildung 2: Ausbreitung der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} unter 45° , EC 3-6, Bild 5.3, siehe [8], Kap. 5.7.1

Die zur Radlastpressung gehörigen Schubspannungen sind für den Schubspannungsnachweis mit $\tau_{oxz,Ed} = 0,2 * \sigma_{oz,Ed}$ zu berücksichtigen.

Nachweis der Stegpressung: $\frac{|\sigma_{oz,Ed}|}{f_y/\gamma_{M0}} \leq 1,0$

Nachweis der zugehörigen lokalen Schubspannung: $\frac{|\tau_{oxz,Ed}|}{f_y/(\gamma_{M0} * \sqrt{3})} \leq 1,0$

6.3 Bauteilnachweis

6.3.1 Ersatzstabverfahren „knickender Obergurt“

Querschnittswerte des Druckflansches (Obergurt + 1/5 Steg):

- A_{Og} Querschnittsfläche des Obergurts (Obergurt + 1/5 Steg)
- $i_{z,Og}$ Trägheitsradius des Obergurts um die Stegachse

Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes

- $M_{y,Ed}$ und $M_{z,Ed}$ sind Bemessungsschnittgrößen des Kranbahnträgers
- $M_{y,Ed}$ wird unter Berücksichtigung des Gurtachsenabstandes ($h - t_f$) in eine Gurtdruckkraft umgerechnet:

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{(h - t_f)}$$

➡ Der Ersatzdruckstab wird durch einachsige Biegung ($M_{z,Ed}$) und Normalkraft ($N_{Og,Ed}$) beansprucht.

1

2

Knicklänge des Ersatz-Druckstabes:

$$- L_{cr} = l \text{ (l Kranbahnträgerlänge)}$$

Nachweis des Druckstabes für die Querschnittsklassen 1 bis 3:

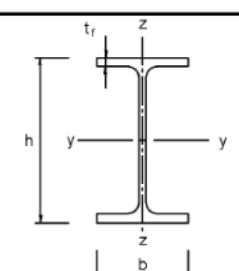
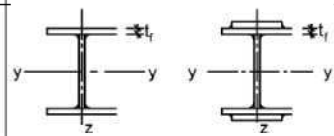

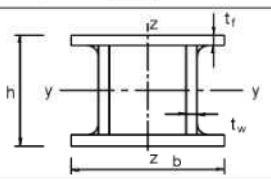
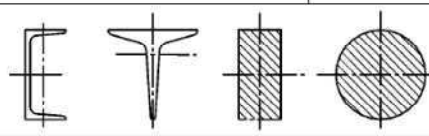
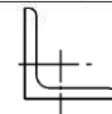
$$\text{Bezugsschlankheitsgrad: } \lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_1 = 93,9 \text{ (für S235)}$$

$$\lambda_1 = 76,4 \text{ (für S355)}$$

$$\text{Bezogener Schlankheitsgrad: } \bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,0g} * \lambda_1}$$

Auswahl der Knicklinie eines Querschnitts:

Tabelle 11: Auswahl der Knicklinie eines Querschnitts, EC3-1-1, Tab. 6.2, siehe [4], Kap. 6.3.1.2

Querschnitt	Begrenzungen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
gewalzte I-Querschnitte 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d c
Geschweißte I-Querschnitte 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d
Hohlquerschnitte 	warmgefertigte	jede	a	a ₀
	kaltgefertigte	jede	c	c
Geschweißte Kastenquerschnitte 	allgemein (außer den Fällen der nächsten Zeile)	jede	b	b
	dicke Schweißnähte: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	jede	c	c
U-, T- und Vollquerschnitte 		jede	c	c
L-Querschnitte 		jede	b	b

3

4

Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien:

Tabelle 12: Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien, EC3-1-1, Tab. 6.1, siehe [4], Kap. 6.3.1.2

Knicklinie	a ₀	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Hinweis: Es wird empfohlen, Walzprofile mit aufgeschweißter Flachstahlschiene ebenfalls als Schweißprofil einzuordnen, da das Anschweißen zusätzliche Imperfektionen verursacht.

$$\Rightarrow \phi = 0,5 * \left[1 + \alpha * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right]$$

Abminderungsfaktor: $\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}}$ jedoch $\chi_z \leq 1,0$

Für die Querschnittsklassen 1 und 2 gilt nach EC 3-1-1, Anhang B:

$$k_{zz} = C_{mz} * \left(1 + (2 * \bar{\lambda}_z - 0,6) * \frac{N_{Og,Ed} * \gamma_{M1}}{\chi_z * A_{Og} * f_y} \right) \text{ jedoch}$$

$$k_{zz} \leq C_{mz} * \left(1 + 1,4 * \frac{N_{Og,Ed} * \gamma_{M1}}{\chi_z * A_{Og} * f_y} \right)$$

mit: $C_{mz} = 0,9$ (Knicken in Form seitlichen Ausweichens)

Nachweis:

$$\frac{N_{Og,Ed} * \gamma_{M1}}{\chi_z * A_{Og} * f_y} + \frac{k_{zz} * M_{z,Ed} * \gamma_{M1}}{W_{Og,z} * f_y} \leq 1,0$$

$W_{Og,z} = W_{Og,pl,z}$ bei den Querschnittsklassen 1 und 2



6.3.2 Biegedrillknicknachweis als Querschnittsnachweis der Schnittgrößen nach Wölbkrafttorsion Theorie II. Ordnung (unter Ansatz von Ersatzimperfectionen)

Ansatz der Ersatzimperfectionen:

Tabelle 13: Vorkrümmung e_0 , EC3-1-1/NA, Tab. NA.2, siehe [4], Anhang A

Querschnitt	Abmessungen	Elastische Querschnittsausnutzung e_0 / L	Plastische Querschnittsausnutzung e_0 / L
gewalzte I-Profile	$h/b \leq 2,0$	1/500	1/400
	$h/b > 2,0$	1/400	1/300
geschweißte I-Profile	$h/b \leq 2,0$	1/400	1/300
	$h/b > 2,0$	1/300	1/200

Diese Werte sind im Bereich $0,7 \leq \bar{\lambda}_{LT} \leq 1,3$ zu verdoppeln

Die Schnittgrößen bzw. Spannungen $\sigma_{x,Ed}$ werden mit geeigneter Software, unter Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion Theorie II. Ordnung, an den maßgebenden Punkten des Querschnitts berechnet und sind dort nachzuweisen.



Nachweis: $\sigma_{x,Ed} < f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$

Hinweis:

Es ist zusätzlich nachzuweisen, dass die Spannungen, unter charakteristischen Lasteneinwirkungen, im elastischen Bereich bleiben (siehe EC 3-6, Kap. 7.5). Dieser Nachweis wird als Gebrauchstauglichkeitsnachweis gewertet.

6.4 Beulnachweise

Hinweise:

a) Der Nachweis nach EC 3-1-5 schließt folgende Einzelnachweise mit ein:

- Plastisches Stauchen des Stegs
- Stegkrüppeln
- Beulen des Gesamtfelds unter Querlasten

b) Liegen mehrere Einzellasten dicht beieinander, ist in der Regel die Beanspruchbarkeit sowohl für jede Einzellast als auch für die gesamte Querbelastung und diese mit einer Länge der starren Lasteinleitung s_s entsprechend dem Abstand der äußeren Einzellast zu ermitteln.

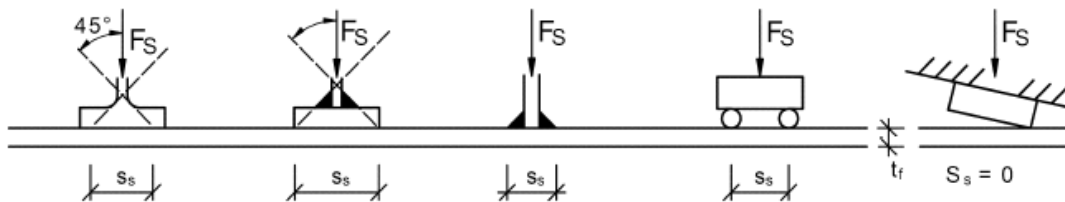


Abbildung 3: Länge der starren Lasteinleitung, EC 3-1-5, Bild 6.2, siehe [5], Kap. 6.3

6.4.1 Beulnachweis bei Stegblechen ohne Längssteifen:

- starre Lasteinleitung s_s auf Höhe der Oberkante des Obergurts

$$s_s = l_{eff} - 2 * t_f$$

⇒ Unter Ansatz einer Lastausbreitung von 45° wird von l_{eff} (siehe oben Lasteinleitungsspannung) mit Hilfe der Flanschdicke t_f auf die Flanschoberkante zurückgerechnet.

- Beulwert k_f

$$k_f = 6 + 2 * \left(\frac{h_w}{a} \right)^2$$

mit: - h_w Lichte Höhe zwischen den Flanschen
- a Beulfeldlänge

- kritische Beullast F_{cr}

$$F_{cr} = 0,9 * k_f * E * \frac{t_w^3}{h_w} \quad t_w \text{ Stegdicke}$$



- Quetschgrenze F_y

Hinweis: Es wird angenommen, dass der Steg über eine Länge von l_y plastisch gestaucht wird.

$$F_y = f_y * t_w * l_y \quad f_y \text{ Streckgrenze}$$

mit: $l_y = s_s + 2 * t_f * (1 + \sqrt{m_1 + m_2})$

dabei ist: $- m_1 = \frac{b_f}{t_w} \quad b_f \text{ Flanschbreite}$

$$- m_2 = 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{für } \bar{\lambda} > 0,5 \quad t_f \text{ Flanschdicke}$$

$$m_2 = 0 \quad \text{für } \bar{\lambda} \leq 0,5$$



Schlankheitswert $\bar{\lambda}$ zur eventuellen Korrektur von m_2

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}}$$

- Abminderungsfaktor χ_F

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}} \leq 1,0$$

- wirksame Länge L_{eff} für die Beanspruchbarkeit auf lokales Beulen

$$L_{eff} = \chi_F * l_y$$

⇒ Beulnachweis für Lasteinleitungsspannung:

$$\eta_2 = \frac{F_{z,Ed} * \gamma_{M1}}{f_y * L_{eff} * t_w} \leq 1,0$$

Dabei ist $F_{z,Ed}$ der Bemessungswert der vertikalen Radlast incl. Schwingbeiwert. Beim Nachweis zwei nah beieinander liegenden Lasten ist $F_{z,Ed}$ die Summe beider Radlasten

⇒ Interaktion des Beulens infolge Lasteinleitungsspannung mit dem Beulen infolge Biegenormalspannung aus $M_{y,Ed}$

$$\eta_2 + 0,8 * \eta_1 \leq 1,4$$

mit: $\eta_1 = \frac{M_{y,Ed} * \gamma_{M0}}{f_y * W_{y,el}}$





6.4.2 Flanschinduziertes Stegblechbeulen:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_y} * \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

mit: - $A_w = h_w * t_w$ Stegfläche

- $A_{fc} = b_f * t_f$ Fläche des Druckflansches

- $k = 0,55$ (wenn nur die elastische Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt wird)

$k = 0,4$ (wenn die plastische Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt wird)



6.4.3 Beulnachweis der Druckflansche:

$c/t \leq \text{grenz } c/t$ Grenzwerte siehe oben: Tabelle c/t -Verhältnisse

7. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit



7.1 vertikale Verformung:

Mittels geeigneter Software kann die vertikale Verformung infolge der maßgebenden Einwirkungskombination berechnet werden.

Grenzwerte für die vertikale Verformung:

Tabelle 14: Grenzwerte für vertikale Verformungen, EC3-6, Tab. 7.2, siehe [8], Kap. 7.3

Beschreibung der Verformung (Durchbiegung und Verschiebung)	Skizze
<p>a) Vertikale Durchbiegung δ_z eines Kranbahnträgers:</p> $\delta_z \leq \frac{L}{600} \text{ und } \delta_z \leq 25 \text{ mm}$ <p>Die vertikale Durchbiegung δ_z sollte als Gesamtdurchbiegung infolge vertikaler Lasten abzüglich möglicher Überhöhungen, analog zu δ_{\max} in EN 1990, Bild A1.1 bestimmt werden.</p>	
<p>b) Differenz Δh_c der vertikalen Durchbiegung zweier benachbarter Träger, die eine Kranbahn bilden:</p> $\Delta h_c \leq \frac{s}{600}$	
<p>c) Vertikale Durchbiegung δ_{pay} infolge der Nutzlast eines Kranbahnträgers bei einer Unterflansch-Laufkatze:</p> $\delta_{\text{pay}} \leq \frac{L}{500}$	

Nachweis: $\text{vorh } f < \text{grenz } f$

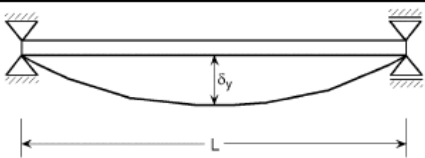

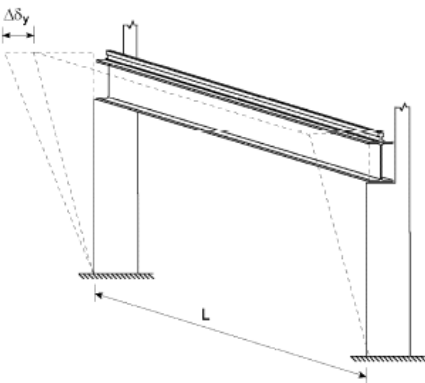
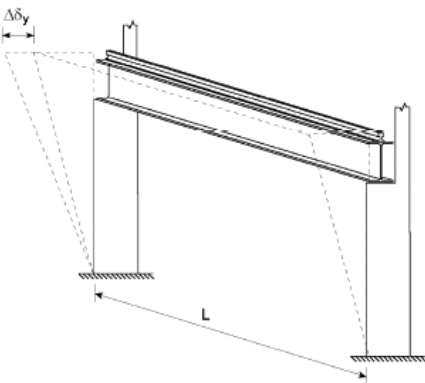
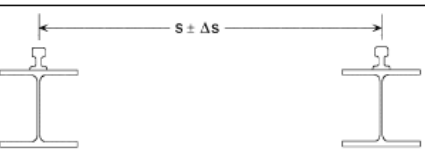
Hinweis: Im Nationalen Anhang des EC 3-6 ist der Wert $\delta_z \leq l/500$ und $\delta_z \leq 25\text{mm}$ zulässig.

7.2 horizontale Verformung:

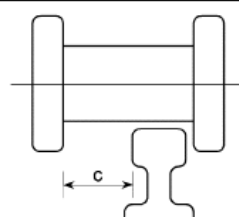
Mittels geeigneter Software kann die vertikale Verformung infolge der maßgebenden Einwirkungskombination berechnet werden.

Grenzwerte für die horizontale Verformung:

Tabelle 15: Grenzwerte für horizontale Verformungen, EC3-6, Tab. 7.1, siehe [8], Kap. 7.3

Beschreibung der Verformung (Durchbiegung oder Verschiebung)	Skizze
a) Horizontale Durchbiegung δ_y eines Kranbahnträgers in Höhe der Oberkante Kranschiene: $\delta_y \leq L/600$	
b) Horizontale Verschiebung δ_y eines Tragwerks (oder einer Stütze) in Höhe der Kranauflagerung: $\delta_y \leq h_c/400$ Dabei ist h_c der Abstand zu der Ebene, in der der Kran gelagert ist (auf einer Kranschiene oder auf einem Flansch)	
c) Differenz $\Delta\delta_y$ der horizontalen Verschiebungen benachbarter Tragwerke (oder Stützen), auf denen Träger einer innen liegenden Kranbahn lagern. $\Delta\delta_y \leq L/600$	
d) Differenz $\Delta\delta_y$ der horizontalen Verschiebungen benachbarter Stützen (oder Tragkonstruktionen), auf denen Träger einer außen liegenden Kranbahn lagern: – infolge der Lastfallkombination von seitlichen Krankräften und Windlast während des Betriebes: $\Delta\delta_y \leq L/600$ – infolge Windlast außer Betrieb: $\Delta\delta_y \leq L/400$	
e) Änderung des Abstandes Δ_c der Schwerlinien der Kranschinen, einschließlich der Auswirkungen von Temperaturänderungen: $\Delta_c \leq 10 \text{ mm}$ [siehe Anmerkung]	

ANMERKUNG Horizontale Verformungen und Abweichungen von Kranbahnträgern werden bei der Berechnung von Kranbahnen gemeinsam berücksichtigt. Die zulässigen Verformungen und Toleranzen sind abhängig von der Detaillausbildung und den Abständen der Kranführungsmittel. Unter der Voraussetzung, dass das Spiel c zwischen Spurrads und Kranschiene (oder zwischen anderen Führungsmitteln und dem Kranbahnträger) ausreichend ist, um die erforderlichen Toleranzen aufzunehmen, können nach Vereinbarung zwischen dem Kranhersteller und dem Bauherrn auch größere Verformungsgrenzwerte für die einzelnen Projekte vereinbart werden.





Nachweis: $vorh\ u < grenz\ u$

Die Nachweise b), c) und d) betreffen nicht den Kranbahnträger an sich, sondern geben Grenzwerte für die Verformung/Verschiebung des Hallentragwerks bzw. der Unterkonstruktion. Informativ ist für b) noch folgende Tabelle für die Grenzwerte der Verformung gegeben:

Tabelle 16: Grenzwerte für Verformung, EC 3-6/NA, Tab. NA.2, siehe [8], Kap 7.3

Hubklasse	grenz δ_y
HC 1	$h_c / 250$
HC 2	$h_c / 300$
HC 3	$h_c / 350$
HC 4	$h_c / 400$

⇒ Hierbei müssen nur die Lasten aus dem Kranbetrieb berücksichtigt werden.



7.3 Stegblechatmen:

Bei Einhaltung des b/t -Verhältnisses des Stegs kann auf den Nachweis des Stegblechatmens verzichtet werden.

$$b_w/t_w \leq 120$$



7.3 Stegblechatmen:

Bei Einhaltung des b/t - Verhältnis des Stegs kann auf den Nachweis des Stegblechatmens verzichtet werden.

$$b_w/t_w \leq 120$$





7.4 Gewährleistung des elastischen Verhaltens:

Hinweis: Um ein elastisches Verhalten zu gewährleisten sollten die Spannungen auf Gebrauchslastniveau begrenzt werden. Die Spannungen der maßgebenden charakteristischen Einwirkungskombination darf die Fließgrenze nicht überschreiten. Diese Einhaltung ist besonders zu prüfen, wenn bei den Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit plastische Reserven ausgenutzt werden.

Die Vergleichsspannungen sind an den maßgebenden Punkten des Querschnitts wie folgt nachzuweisen:

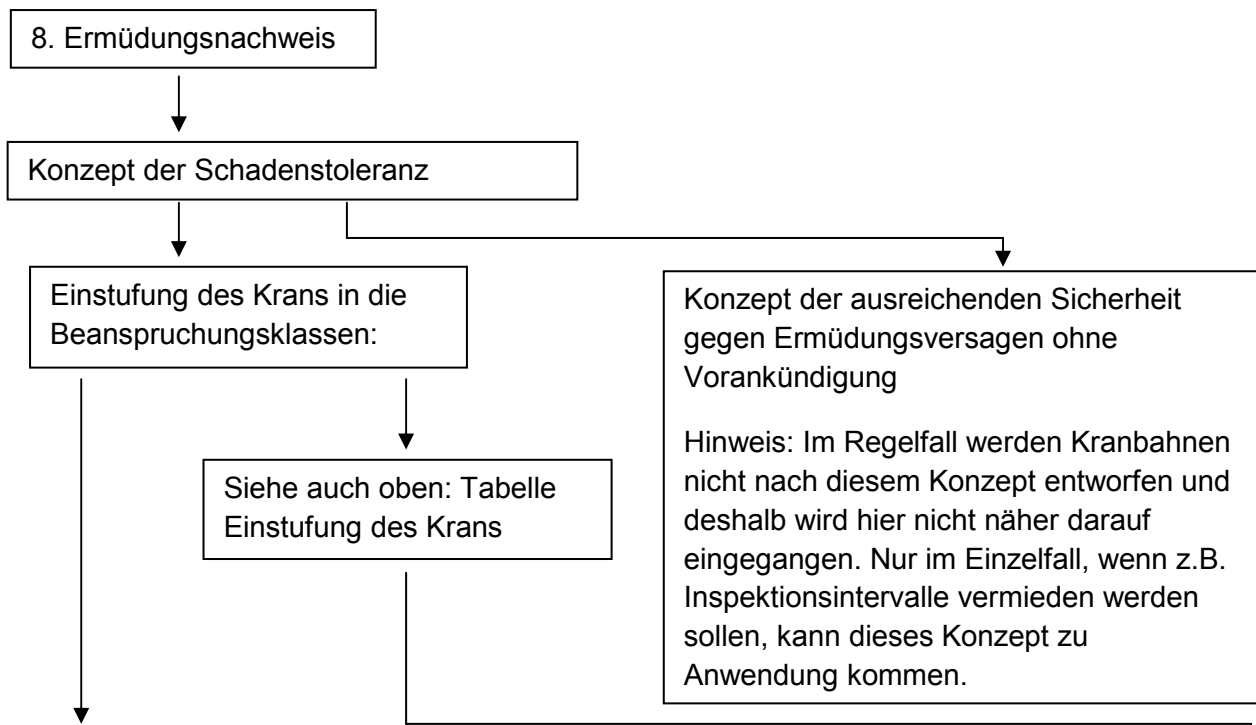
$$\sigma_{v,ser} \leq f_y / \gamma_{M,ser}$$



7.5 Schwingungen des Untergurt:

Nachweis: $L/i_z \leq 250$

mit: - L Abstand der seitlichen Halterung
 - i_z Trägheitsradius des Unterflansches



Klassifizierung der Ermüdungseinwirkungen von Kranen:

Tabelle 17: Klassifizierung der Ermüdungseinwirkungen von Kranen nach EN 13001-1, EC 1-3, Tab. 2.11, siehe [3], Kap. 2.12.1

Klasse des Lastkollektivs		Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
		$kQ \leq 0,0313$	$0,0313 < kQ \leq 0,0625$	$0,0625 < kQ \leq 0,125$	$0,125 < kQ \leq 0,25$	$0,25 < kQ \leq 0,5$	$0,5 < kQ \leq 1,0$
Klasse der Gesamtzahl von Arbeitsspielen							
U_0	$C \leq 1,6 \times 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
U_1	$1,6 \times 10^4 < C \leq 3,15 \times 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_1
U_2	$3,15 \times 10^4 < C \leq 6,30 \times 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_1	S_2
U_3	$6,30 \times 10^4 < C \leq 1,25 \times 10^5$	S_0	S_0	S_0	S_1	S_2	S_3
U_4	$1,25 \times 10^5 < C \leq 2,50 \times 10^5$	S_0	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4
U_5	$2,50 \times 10^5 < C \leq 5,00 \times 10^5$	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
U_6	$5,00 \times 10^5 < C \leq 1,00 \times 10^6$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
U_7	$1,00 \times 10^6 < C \leq 2,00 \times 10^6$	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
U_8	$2,00 \times 10^6 < C \leq 4,00 \times 10^6$	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
U_9	$4,00 \times 10^6 < C \leq 8,00 \times 10^6$	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9

Dabei ist

kQ ein Lastkollektivbeiwert für alle Arbeitsvorgänge des Krans;

C die Gesamtzahl von Arbeitsspielen während der Nutzungsdauer des Krans.

ANMERKUNG Die Klassen S_i werden in EN 13001-1 durch den Lasteinwirkungs-Verlaufparameter s bestimmt.

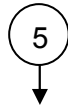
Dieser ist definiert als:

$s = \nu \cdot k$ mit:

k der Spannungsspektrumfaktor;

ν die Anzahl der Lastspiele C bezogen auf $2,0 \times 10^6$ Lastspiele.

Die Klassifizierung basiert auf einer Gesamtnutzungsdauer von 25 Jahren.



Schwingbeiwert φ_{fat} (Schadensäquivalenter dynamischer Vergrößerungsbeiwert):

$$- \varphi_{fat,1} = \frac{1+\varphi_1}{2}$$

$$- \varphi_{fat,2} = \frac{1+\varphi_2}{2}$$

Hinweis: Bei Berücksichtigung von mehreren Kranen sind die Hubklassen des zweiten und aller weiteren Krane ebenfalls so zu bestimmen.



Berechnung der Schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{E,2}$:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda * \Delta\sigma$$

mit: - λ schadensäquivalenter Beiwert ($N = 2 * 10^6$ Lastspiele)

- $\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite

λ_i -Werte entsprechend der Kranklassifizierung:

Tabelle 18: λ_i – Werte entsprechend der Kranklassifizierung, EC 1-3, Tab. 2.12, siehe [3], Kap. 2.12.1

Klassen S	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Normalspannung	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,00	1,260	1,587
Schubspannung	0,379	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,00	1,149	1,320

Bestimmung der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ unter Beachtung des Kerbfalls:

Im EC 3-1-9, Tabelle 8.1 bis 8.10 lassen sich die Kerbfälle der zu berücksichtigten Konstruktionsdetails entsprechend zuordnen. Jeder Kerbfall besitzt hierbei eine Kerbgruppennummer, welche gleichzeitig den Wert der ertragbare Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_c$ bei $N_E = 2 * 10^6$ Lastwechseln angibt.

⇒ Kurz: Kerbfallnummer = Bezugswert $\Delta\sigma_c$ bei $N_E = 2 * 10^6$ Lastwechseln



Beispiele typischer Kerbfälle an Kranbahnträgern für Schweiß- und Walzprofile:

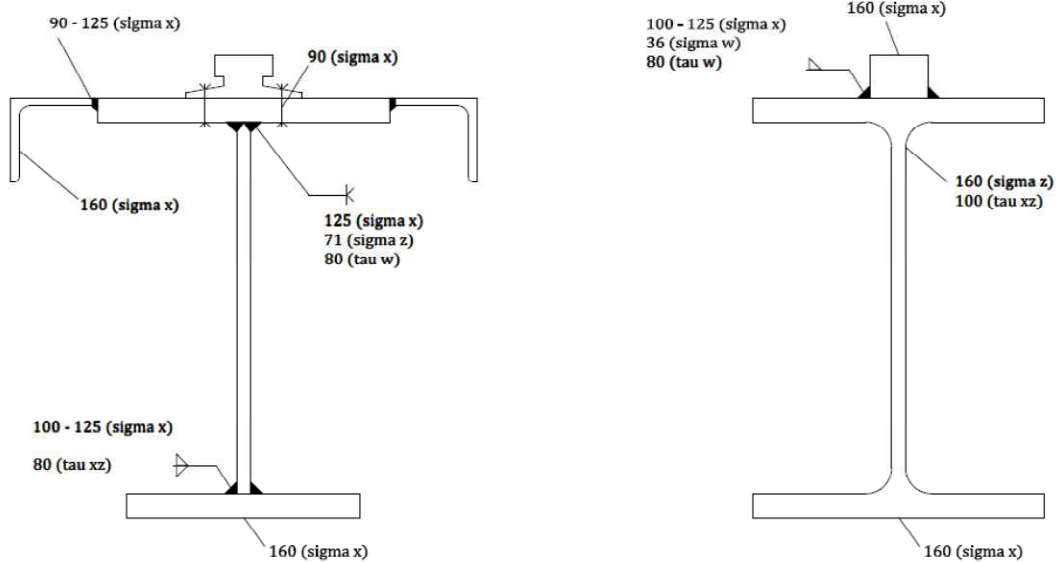


Abbildung 4: typische Kerbfälle, eigene Zeichnung mit [14]

a) Nachweis für einen einzelnen Kran:

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2}}{\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0$$

Falls gleichzeitig Längs- und Schubspannung wirken lautet der Nachweis:

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2}}{\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^5 \leq 1,0$$

Wirkt zusätzlich eine Normalspannung lautet der Nachweis:

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{x,E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{z,E,2}}{\frac{\Delta\sigma_{z,c}}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2}}{\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^5 \leq 1,0$$

Hinweis: Werden zwei Krane in erheblichem Maße zusammen betrieben, sind sie als ein einziger Kran zu behandeln. Eine Definition von „erheblichem Maße“ wird jedoch nicht angegeben!



b) Nachweis für mehrere Krane:

Hierbei wird die Gesamtschädigung berücksichtigt, welche auf Basis der Addition der Einzelschädigung beruht:

$$\sum_i D_i + D_{dup} \leq 1,0$$

$$\text{mit: } - D_i = \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{E,2,i}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2,i}}{\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^5$$

Schädigung eines einzelnen unabhängig wirkenden Krans i .

dabei ist: - $\Delta\sigma_{E,2,i}$ und $\Delta\tau_{E,2,i}$ schadensäquivalente Spannungsschwingbreiten der Einzelkrane i

$$- D_{dup} = \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{E,2,dup}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2,dup}}{\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^5$$

Zusätzliche Schädigung infolge der Kombination von zwei oder mehrere Krane, welche zeitweise zusammen wirken. Die Werte $\Delta\sigma_{E,2,dup}$ und $\Delta\tau_{E,2,dup}$ dürfen mit dem Schadensäquivalenten Beiwert λ_{dup} berechnet werden.

Bei 2 Kranen darf λ_{dup} 2 Klassen unter der Beanspruchungsklasse des am niedrigsten eingestuften Krans zur Berechnung herangezogen werden.

Bei 3 oder mehreren Kranen darf λ_{dup} 3 Klassen unter der Beanspruchungsklasse des am niedrigsten eingestuften Krans zur Berechnung herangezogen werden.

c) Nachweis von Radlasteinleitungsspannungen:

Da es bei einer Überfahrt eines zweiachsigen Krans mit gleichgroßen vertikalen Radlasten zu einem zweifachen Lastwechsel kommt, bedeutet dies auch, dass somit zwei Spannungsspitzen entstehen. Diese Erhöhung der Ermüdungswirkung muss berücksichtigt werden. Es kann wie folgt vorgegangen werden:

- Wenn infolge der Überfahrt eines zweiachsigen Krans zwei Spannungsspitzen entstehen, wird zum Nachweis die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht.
- Bei der Überfahrt eines vierachsigen Krans und der Entstehung von vier Spannungsspitzen, wird die Beanspruchungsklasse um 2 erhöht.

Eine Beispielrechnung für diesen Algorithmus ist unter Inhaltspunkt 4 zu finden.

3 Systembeschreibung

3.1 Allgemeine Beschreibung des vorhandenen Bauwerks

Das vorhandene Bauwerk ist eine Systemhalle aus der Typensegmentreihe „Eingeschossige Gebäude mit Satteldach und Brückenkran; Stahlbetonskelett – Montagebau; 6000mm Achsabstand“, welche im Jahr 1964 errichtet wurde. Zur damaligen Zeit wurde das Bauwerk nach den Prinzipien des Baukastensystems entwickelt, um vielfältige Kombinationsbeispiele realisieren zu können. Sie dient heutzutage der Stahl- und Brückenbau Niesky GmbH als Konservierungshalle, in welcher die fertiggestellten Bauteile mit einer Beschichtung versehen werden. Die Systemfläche der einschiffigen Halle beträgt die Maße 24 x 84 Meter, wobei sie in der Länge von 15 und in der Breite von sechs, in Hülsefundamente eingespannte Stahlbetonstützen, eingeteilt ist. Die längsseitig angeordneten Stützen sind mit Konsolen versehen, auf denen geschweißte Kranbahnträger, als Einfeldträger mit einer Spannweite von 6,0m verlaufen. Zwei Doppelbrückenkrane mit einer Hublast von je 12,5 Tonnen und einer Spannweite von 22 Metern sind hierbei vorhanden. Als Dachtragwerk dienen gelenkig als Riegel aufgelagerte Spannbeton-Satteldach-Vollwandbinder mit einer Dachneigung von 10%. Um eine geeignete Wärmedämmung zu gewährleisten, dienen Außenwandplatten aus Leichtbeton.

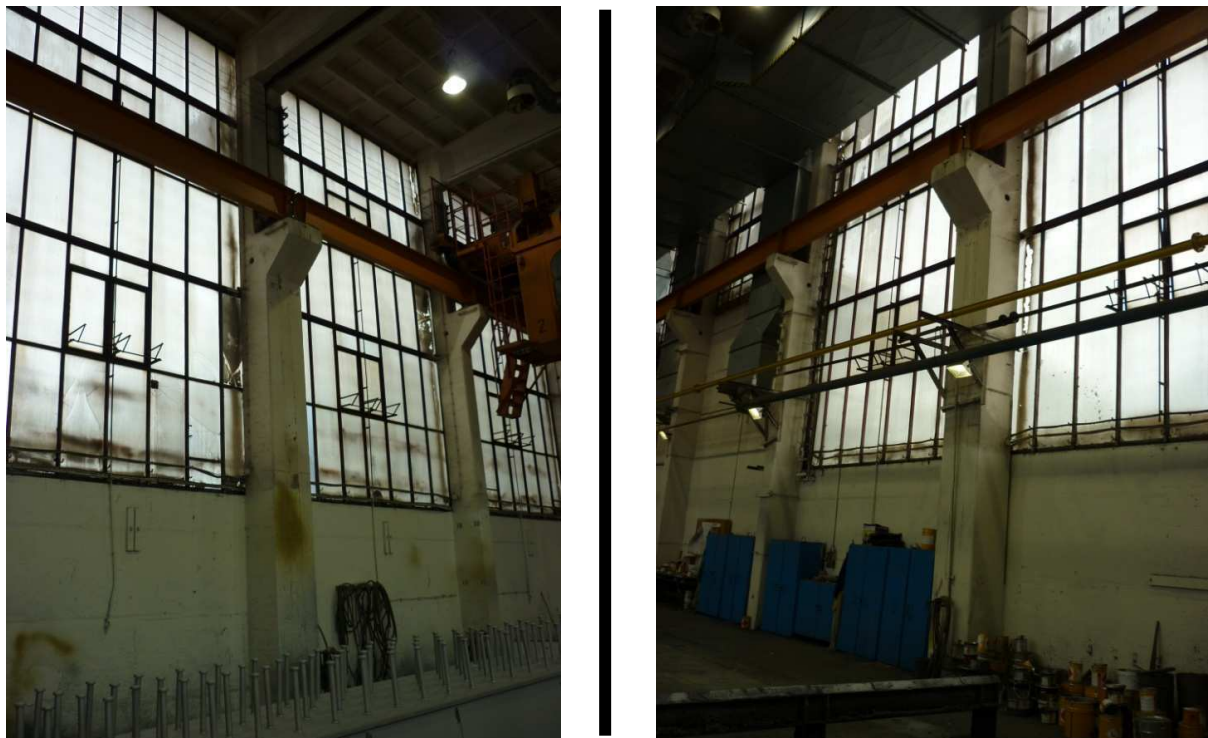


Abbildung 5: Kranbahn mit Stahlbetonstützen (Bestand), eigene Bilder

3.2 Allgemeine Beschreibung der neu zu errichtenden Konstruktion

Der Bauherr, die Stahl- und Brückenbau Niesky GmbH, möchte die Hublasten der Krane, in der eingangs beschriebenen Konservierungshalle, von zweimal 12,5 Tonnen auf zweimal 20 Tonnen erhöhen. Da für die bestehenden Stahlbetonstützen keinerlei statischen Unterlagen sowie Bewehrungspläne vorhanden sind, können diese nicht mit in die Berechnungen einbezogen werden. Es muss somit eine neue Konstruktion, auf denen die Brückenkrane fahren können bemessen, nachgewiesen und konstruiert werden. Der Bauherr gibt ebenfalls vor, dass die Möglichkeit bestehen muss, die derzeit vorhandenen Krane auf der neuen Unterstützungskonstruktion fahren zu lassen. Das heißt also, dass u. a. die Spannweite von 22 Metern, aber auch das Niveau der Schienenoberkante beibehalten werden muss.

Die Umsetzung der neuen Kranbahn soll nun so realisiert werden, dass mittig zwischen die vorhandenen Stahlbetonstützen, geschweißte Stahlprofilstützen gestellt werden, auf denen die Kranbahnträger montiert sind. Hierbei ist zu achten, dass die neuen Kranbahnträger nicht auf den vorhandenen Konsolen aufliegen können, da die Fahrbahnnachsen zwischen alter und neuer Konstruktion gleichbleiben müssen. Verbände in Längsrichtung nehmen die Anfahr-, Brems- und Anpralllasten auf. Die Kräfte, welche durch Schräglauf der Kranbrücke entstehen, werden durch die fachwerkartig konstruierte Stütze in das Fundament eingeleitet. Die neu zu bemessenden Kranbahnträger werden, auf Grund des Baugrundes, wieder als Einfeldträger ausgeführt, da dieses System unempfindlicher gegen die Setzung des Untergrundes ist. Die Stahlstützen werden auf die mit Zugankern versehenen Fundamente aufgesetzt und mit Mörtel vergossen.

3.3 Montageablauf der Unterstützungskonstruktion sowie der Kranbahnträger

Der vorhandene Betonfußboden wird an den gekennzeichneten Stellen, der neuen Stützenfundamente, aufgebrochen und ausgehoben. Die bewehrten Fundamente werden vor Ort mit Beton C16/20 vergossen und untereinander auf ein Niveau gebracht.

Die Stahlstützen werden nun einzeln eingesetzt, ebenfalls justiert und in Fahrbahnnachse ausgerichtet. Das Montieren der Bremsverbände an die vorgesehen Anschlussbleche wird mittels Schrauben umgesetzt. Hierfür müssen an den jeweiligen Stellen die vorhandenen Stahlbetonkonsolen entfernt werden, um die Verbandstäbe einsetzen zu können. Letztlich erfolgt das Aufsetzen der Kranbahnträger auf die Stützen und das Verschrauben untereinander mit den Stehblechen. Die in der Stirnplatte des Kranbahnträgers befindlichen Langlöcher, senkrecht zur Fahrbahnrichtung, dienen dem Ausrichten, um die Parallelität der beiden Fahrbahnnachsen zu realisieren.

Nach dem Justieren der gesamten Kranbahn, in den vorgegebenen Toleranzgrenzen, werden die Stützen in den Fundamenten mit Mörtel vergossen.

4 Nachweis und Bemessung des Kranbahnträgers

4.1 allgemeine Angaben

4.1.1 Vorgaben des Bauherrn

-zwei Brückenkrane mit je 20t Hublast

-Hakenbetrieb

-Zuordnung der Beanspruchungsgruppe (Lagerkran mit kontinuierlichem Betrieb)

→ Hubklasse **HC3**; Beanspruchungsklasse **S₆** nach EC 1-3 Anhang B

-Tandembetrieb in erheblichem Maße

4.1.2 Daten des einzubauenden Krans

-Kranfahrgeschwindigkeit: $v_{KR} = 10 / 40 \text{ m/min}$

-Kranfahrgeschwindigkeit: $v_{KA} = 5 - 25 \text{ m/min}$

-Hubgeschwindigkeit: $v_h = 3 / 0,5 \text{ m/min}$

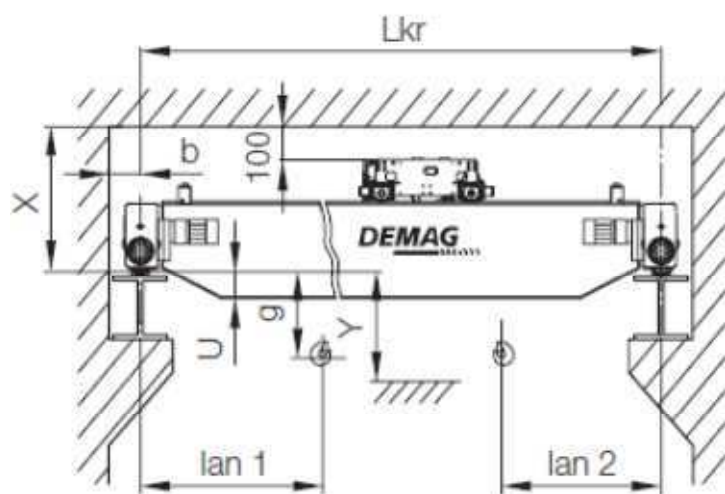
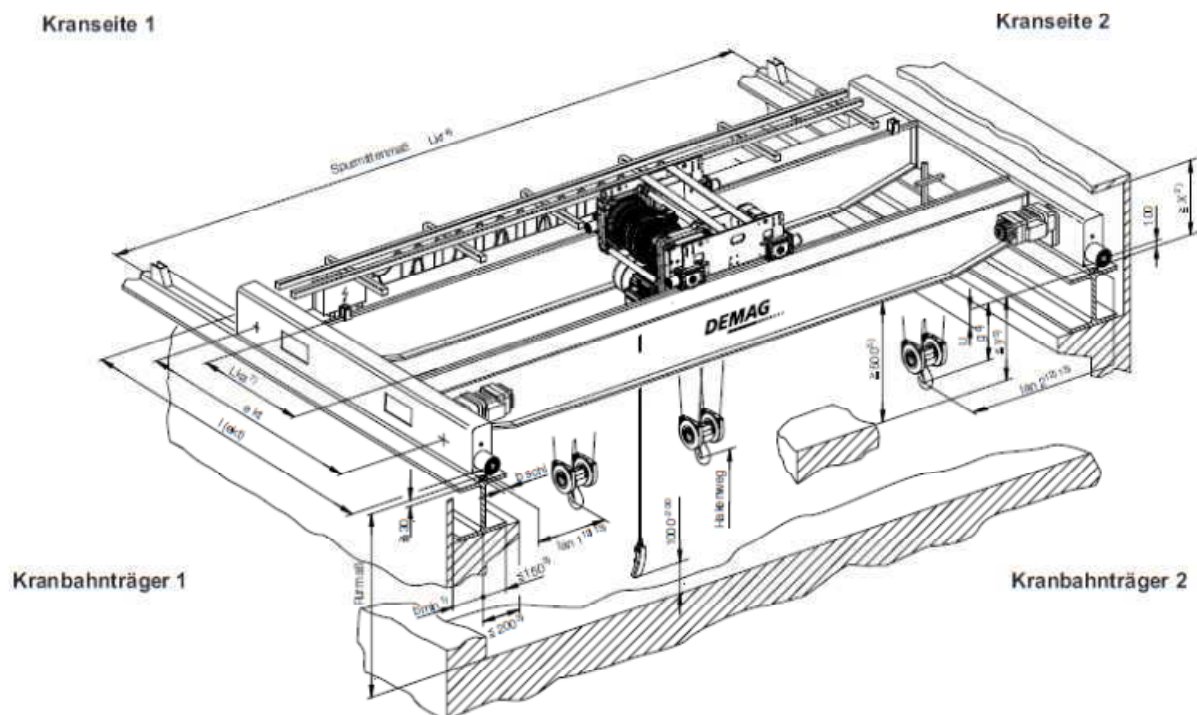
-Radabstand: 3,15m

-Seitenführung über Spurkränze

-Kranfahrwerkssystem IFF

-Radlasten aus dem Datenblatt des Kranherstellers DEMAG:

L_{KR}	m	22
max. R1 (+G _H)	kg	13541
max. R2 (+G _H)	kg	12448
max. R3 (+G _H)	kg	
max. R4 (+G _H)	kg	
min. R1 (+G _H)	kg	3475
min. R2 (+G _H)	kg	3472
min. R3 (+G _H)	kg	
min. R4 (+G _H)	kg	
$R_m = (2 \times \max R + \min R) / 3$	kg	10204
L	kN	3,88
min. HM	kN	3,32
max. HM	kN	12,41
S	kN	42,32
max. H _s	kN	33,43
min. H _s	kN	8,90
$\max P_U (v_{KR} = 40 \text{ m/min})$	kN	55,88
$\max P_U (v_{KR} = 60 \text{ m/min})$	kN	84,36
G _G	kg	12935



Kran			Kranträger			Katz					Fahrwerk						
L _{KR}	max. R	G _G	X 1)	H	U	I _{an1} 1)	I _{an2} 1)	g	y	L _{ka}	I _{an3}	I _{an4}	d	e _{kt}	L _{ekt}	DPZ	b 1)
22	13541	12935	1110	1010	565	1515	1390	580	1065	1400	1987	1805	250	3150	3792	130	200

Abbildung 6: Übersicht Doppelbrückenkrane, Datenblatt Demag-Standard-Zweitträger-Laufkran; DEMAG Cranes & Components; www.demagcranes.de

4.2 Lastannahmen

4.2.1 Ermittlung der Radlasten

-Allgemeine Erläuterung: $R_{1,1,2}$ 1 ...Kran 1

1 ...Achse1,

2 ...2 \triangleq nichtangetrieben (1 \triangleq angetrieben)

-Vertikale Radlasten: $R_{1,1,1} = Q_{1,1,1} = 135,41kN$ (infolge EG Kranbrücke + Hublast)

$R_{1,1,2} = Q_{1,1,2} = 124,48kN$ (infolge EG Kranbrücke + Hublast)

$R_g = Q_c = 32,34kN$ (Radlast infolge EG Kranbrücke)

$R_{h,1,1,1} = Q_{h,1,1,1} = 103,03kN$ (Radlast infolge Hublast)

$R_{h,1,1,2} = Q_{h,1,1,2} = 92,1kN$ (Radlast infolge Hublast)

$R_{p,dyn,1,1,1} = 113,3kN$ (Radlast infolge 110% Dyn. Prüflast)

$R_{p,dyn,1,1,2} = 101,3kN$ (Radlast infolge 110% Dyn. Prüflast)

$R_{p,stat,1,1,1} = 128,8kN$ (Radlast infolge 125% Stat. Prüflast)

$R_{p,stat,1,1,2} = 115,1kN$ (Radlast infolge 125% Stat. Prüflast)

-> Kran2 analog

-Horizontale Radlast:

a) quer zur Fahrbahn

Spurführungskraft: $H_{S,1,1,1} = H_{S,2,1,1} = 0$

$H_{S,1,1,2} = H_{S,2,1,2} = -33,43kN$

$H_{S,1,2,1} = H_{S,2,2,1} = 0$

$H_{S,1,2,2} = H_{S,2,2,2} = -33,42kN$

Antriebskraft: $H_{M,1,1,1} = H_{M,2,1,1} = 12,41kN$

$H_{M,1,1,2} = H_{M,2,1,2} = -12,41kN$

$H_{M,1,2,1} = H_{M,2,2,1} = -3,32kN$

$H_{M,1,2,2} = H_{M,2,2,2} = 3,32kN$

-> Kran2 analog

Pufferkräfte: $H_{B,2} = 0,1 * (200kN + 18,5kN) = 21,9kN \rightarrow 10\% * (\text{Hublast} + \text{EG Katze})$

b) längs zur Fahrbahn

Pufferkräfte: $H_{B,1} = 55,88kN$

\rightarrow Schwingbeiwert $\varphi_7 = 1,25$ schon enthalten

4.2.2 Vordimensionierung

-System: Einfeldträger, Spannweite $l = 6,0m$

-HEB 450 S 235 $g_{HEB450} = 1,71kN/m$

-Winkel L90x9 S 235 $g_{L90x9} = 0,122kN/m$

-Vierkantschiene 60 S 355 $g_{VK60} = 0,28kN/m$

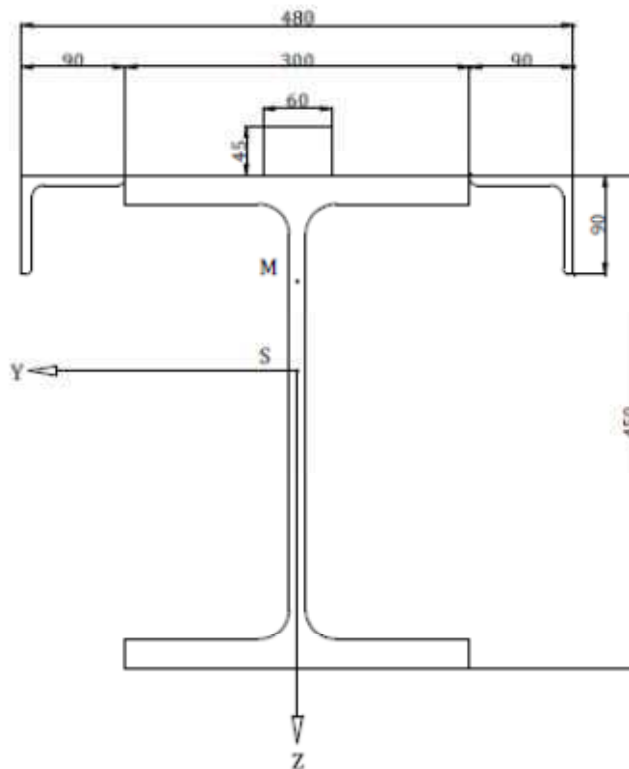


Abbildung 7: Kranbahnträgerquerschnitt, eigene Zeichnung mit [14]

-Schienenschweißnaht: automatengeschweißt, mit Ansatzstellen, $a = 10mm$

-rechnerisches Eigengewicht des KBT incl. Schiene: $g_{KBT} = 2,17kN/m$

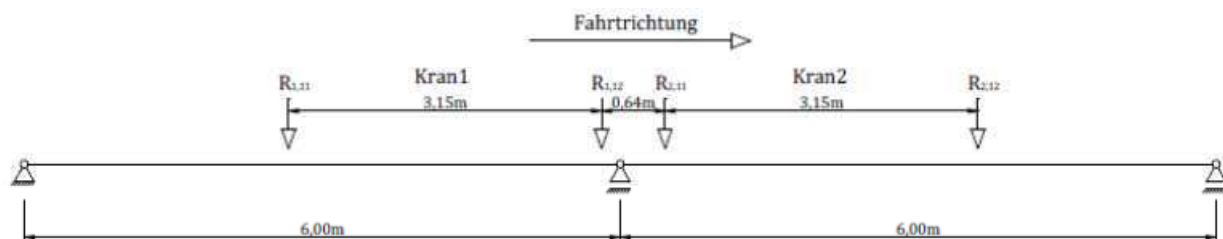


Abbildung 8: Systemdarstellung von zwei KBT mit Kranüberfahrt in einer Achse, eigene Zeichnung mit [14]

4.2.3 Schwingbeiwerte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

Tabelle 19: dynamische Faktoren φ_i , EC1-3, Tab. 2.1, siehe [3], Kap. 2.2.2

Dynamische Faktoren	Einfluss, der berücksichtigt wird	Anzuwenden auf
φ_1	– Schwingungsanregung des Krantragwerks infolge Anheben der Hublast vom Boden	Eigengewicht des Krans
φ_2 oder φ_3	– dynamische Wirkungen beim Anheben der Hublast vom Boden – dynamische Wirkungen durch plötzliches Loslassen der Nutzlast, wenn zum Beispiel Greifer oder Magneten benutzt werden	Hublast
φ_4	– dynamische Wirkung hervorgerufen durch Fahren auf Schienen oder Fahrbahnen	Eigengewicht des Krans und Hublast
φ_5	– dynamische Wirkungen verursacht durch Antriebskräfte	Antriebskräfte
φ_6	– dynamische Wirkungen infolge einer Prüflast, die durch die Antriebe entsprechend den Einsatzbedingungen bewegt wird	Prüflast
φ_7	– dynamische elastische Wirkungen verursacht durch Pufferanprall	Pufferkräfte

Tabelle 20: dynamische Faktoren φ_i für vertikale Lasten, EC1-3, Tab. 2.4, siehe [3], Kap. 2.6

Werte für dynamische Faktoren	
φ_1	$0,9 < \varphi_1 < 1,1$ Die beiden Werte 1,1 und 0,9 decken die unteren und oberen Werte des Schwingungsimpulses ab.
φ_2	$\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h$ v_h - konstante Hubgeschwindigkeit in m/s $\varphi_{2,\min}$ und β_2 siehe Tabelle 2.5
φ_3	$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m} (1 + \beta_3)$ Dabei ist <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;">Δm</div> <div>der losgelassene oder abgesetzte Teil der Masse der Hublast;</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;">m</div> <div>die Masse der gesamten Hublast;</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;">$\beta_3 = 0,5$</div> <div>bei Kranen mit Greifern oder ähnlichen Vorrichtungen für langsames Absetzen;</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;">$\beta_3 = 1,0$</div> <div>bei Kranen mit Magneten oder ähnlichen Vorrichtungen für schnelles Absetzen;</div> </div>
φ_4	$\varphi_4 = 1,0$ vorausgesetzt, dass die in EN 1993-6 festgelegten Toleranzen für Kranschiene eingehalten werden.
ANMERKUNG Für den Fall, dass die in EN 1993-6 festgelegten Toleranzen nicht eingehalten werden, kann der Faktor φ_4 mit dem in CEN/TS 13001-2 enthaltenen Modell bestimmt werden.	

Tabelle 21: Werte für β_2 und $\varphi_{2,\min}$, EC1-3, Tab. 2.5, siehe [3], Kap. 2.6

Hubklasse	β_2	$\varphi_{2,\min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20
ANMERKUNG Die Krane werden zur Berücksichtigung der dynamischen Wirkungen beim Aufheben der Last vom Boden in die Hubklassen HC1 bis HC4 eingestuft. Die Auswahl der Hubklasse hängt vom jeweiligen Krantyp ab, siehe Anhang B.		

Tabelle 22: dynamischer Faktor φ_5 , EC1-3, Tab. 2.6, siehe [3], Kap. 2.7.2

Zahlenwerte für für den Faktor φ_5	Anzuwenden auf
$\varphi_5 = 1,0$	Fliehkräfte
$1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$	Systeme mit stetiger Veränderung der Kräfte
$1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$	wenn plötzliche Veränderungen der Kräfte auftreten
$\varphi_5 = 3,0$	bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel

Schwingbeiwert φ_6 für Prüflasten: vgl. EC1-3 [3], Kap. 2.10

- Dynamische Prüflast: Die Prüflast wird entsprechend dem vorgesehenen Kraneinsatz von den Antrieben bewegt. Die Prüflast sollte mindestens 110% der Nenn-Hublast betragen.

$$\varphi_6 = 0,5 * (1,0 + \varphi_2)$$

- Statische Prüflast: Die Belastung des Krans wird zu Prüfzwecken ohne Verwendung von den Antrieben erhöht. Die Prüflast sollte mindestens 125% der Nenn-Hublast betragen.

$$\varphi_6 = 1,0$$

Tabelle 23: Faktor φ_7 , EC1-3, Tab. 2.10, siehe [3], Kap. 2.11.1

Werte für Faktor φ_7	Eigenschaft des Puffers
$\varphi_7 = 1,25$	$0,0 \leq \xi_b \leq 0,5$
$\varphi_7 = 1,25 + 0,7 (\xi_b - 0,5)$	$0,5 \leq \xi_b \leq 1$

Bei Verwendung von Puffern sollten die durch Starrkörperanalyse ermittelten Kräfte aus Pufferstoß mit dem Beiwert φ_7 vervielfacht werden, um elastische Effekte zu berücksichtigen.

Der Beiwert φ_7 muss wie folgt gewählt werden:

$$\varphi_7 = 1,25 \quad \text{bei Verwendung von Puffern mit linearen Kennlinien,}$$

$$\varphi_7 = 1,6 \quad \text{bei Verwendung von Puffern mit viereckiger Fläche unter der Kennlinie.}$$

Bei Puffern mit anderen Kennlinien sind andere aus Berechnung oder Versuch gewonnene Werte einzusetzen.

Schwingbeiwerte für Kran 1

$$\varphi_1 = 1,1$$

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 * v_h = 1,15 + 0,51 * \frac{3m/min}{60s/min} = 1,18$$

φ_3 nicht zu berücksichtigen, da keine plötzliches loslassen der Nutzlast (z.B. durch Magnete) besteht

$$\varphi_4 = 1,0$$

$$\varphi_5 = 1,5 \text{ (System mit stetiger Veränderung der Kräfte)}$$

$$\varphi_6 = 0,5 * (1 + \varphi_2) = 0,5 * (1 + 1,18) = 1,09 \quad \dots \text{für 110\% Prüflast (dynamisch)}$$

$$\varphi_6 = 1,0 \quad \dots \text{für 125\% Prüflast (statisch)}$$

$$\varphi_7 = 1,25$$

Schwingbeiwerte für Kran 2

Bei der Berechnung von Spannungen aus dem gleichzeitigen wirken mehrerer Krane ist für den Kran mit der größten Radlast (einschließlich Schwingbeiwert) mit dessen Schwingbeiwert und für die übrigen mit dem Schwingbeiwert der Hubklasse HC1 nach DIN EN 1991-3 zurechnen. (siehe DIN EN 1993-6/NA [8], S.5)

$$\varphi_1 = 1,1$$

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 * v_h = 1,05 + 0,17 * \frac{3m/min}{60s/min} = 1,06$$

φ_3 nicht zu berücksichtigen, da keine plötzliches loslassen der Nutzlast (z.B. durch Magnete) besteht

$$\varphi_4 = 1,0 \text{ (spezifizierten Maßabweichungen nach EC0-2 werden eingehalten)}$$

$$\varphi_5 = 1,5 \text{ (System mit stetiger Veränderung der Kräfte)}$$

$$\varphi_6 = 0,5 * (1 + \varphi_2) = 0,5 * (1 + 1,06) = 1,03 \quad \dots \text{für 110\% Prüflast (dynamisch)}$$

$$\varphi_6 = 1,0 \quad \dots \text{für 125\% Prüflast (statisch)}$$

$$\varphi_7 = 1,25$$

4.2.4 Erstellen der Lastgruppen

Tabelle 24: Lastgruppen mit dynamischen Faktoren, die als eine einzige charakteristische Einwirkung anzusehen sind, EC1-3, Tab. 2.2, siehe [3], Kap. 2.2.3

		Symbol	Abschnitt	Lastgruppen									
				ULS							Prüf- last	Außer- ge- wöhn- lich	
				1	2	3	4	5	6	7			
1	Eigengewicht des Krans	Q_c	2.6	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1
2	Hublast	Q_h	2.6	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	η^1	-	1	1
3	Beschleunigung der Kranbrücke	H_L, H_T	2.7	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-	φ_5	-	-
4	Schräglauf der Kranbrücke	H_S	2.7	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Beschleunigen oder Bremsen der Laufkatze oder Hubwerk	H_{T3}	2.7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Wind in Betrieb	F_W^*	Anhang A	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Prüflast	Q_T	2.10	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-
8	Pufferkraft	H_B	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-
9	Kippkraft	H_{TA}	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
ANMERKUNG Zu Wind außerhalb Betrieb, siehe Anhang A.													
¹ η ist der Anteil der Hublast, der nach Entfernen der Nutzlast verbleibt, jedoch nicht im Eigengewicht des Krans enthalten ist.													

4.2.4.1 charakteristische Werte der vertikalen Radlasten

Definition der Radlasten: $F_{a,...} \triangleq$ vertikale Radlast für Lastgruppe 1

$F_{b,...} \triangleq$ vertikale Radlast für Lastgruppe 5

$F_{c,...} \triangleq$ vertikale Radlast für Lastgruppe 8

$F_{d,...} \triangleq$ vertikale Radlast für Lastgruppe 9

Lastgruppe 1: Kran 1

$$F_{a,1,1,1} = \varphi_1 * R_g + \varphi_2 * R_{h,1,1,1} = 1,1 * 32,34kN + 1,18 * 103,03kN$$

$$F_{a,1,1,1} = 157,1kN$$

$$F_{a,1,1,2} = \varphi_1 * R_g + \varphi_2 * R_{h,1,1,2} = 1,1 * 32,34kN + 1,18 * 92,1kN$$

$$F_{a,1,1,2} = 142,1kN$$

Kran 2

$$F_{a,2,1,1} = \varphi_1 * R_g + \varphi_2 * R_{h,2,1,1} = 1,1 * 32,34kN + 1,06 * 103,03kN$$

$$F_{a,2,1,1} = 144,8kN$$

$$F_{a,2,1,2} = \varphi_1 * R_g + \varphi_2 * R_{h,2,1,2} = 1,1 * 32,34kN + 1,06 * 92,1kN$$

$$F_{a,2,1,2} = 133,2kN$$

Lastgruppe 2: nicht maßgebend $\varphi_1 = 1,1$ $\varphi_2 = 1,0$

Lastgruppe 3: nicht maßgebend $\varphi_1 = 1,0$ $\varphi_2 = 0$

Lastgruppe 4: nicht maßgebend $\varphi_1 = 1,0$ $\varphi_2 = 1,0$

Lastgruppe 5: Kran 1

$$F_{b,1,1,1} = \varphi_4 * R_g + \varphi_4 * R_{h,1,1,1} = 1,0 * 32,34kN + 1,0 * 103,03kN$$

$$F_{b,1,1,1} = 135,41kN$$

$$F_{b,1,1,2} = \varphi_4 * R_g + \varphi_4 * R_{h,1,1,2} = 1,0 * 32,34kN + 1,0 * 92,1kN$$

$$F_{b,1,1,2} = 124,48kN$$

Kran 2

$$F_{b,2,1,1} = \varphi_4 * R_g + \varphi_4 * R_{h,1,1,1} = 1,0 * 32,34kN + 1,0 * 103,03kN$$

$$F_{b,2,1,1} = 135,41kN$$

$$F_{b,2,1,2} = \varphi_4 * R_g + \varphi_4 * R_{h,1,1,2} = 1,0 * 32,34kN + 1,0 * 92,1kN$$

$$F_{b,2,1,2} = 124,48kN$$

Lastgruppe 6: nicht maßgebend $\varphi_4 = 1,0$

Lastgruppe 7: nicht maßgebend

Lastgruppe 8: -Dynamische Prüflast ($\gamma_{F,Test} = 1,1$)

Kran 1

$$F_{c,1,1,1} = \varphi_1 * R_g + \varphi_6 * R_{p,dyn,1,1,1} = 1,1 * 32,34kN + 1,09 * 113,3kN$$

$$F_{c,1,1,1} = 159,1kN$$

$$F_{c,1,1,2} = \varphi_1 * R_g + \varphi_6 * R_{p,dyn,1,1,2} = 1,1 * 32,34kN + 1,09 * 101,3kN$$

$$F_{c,1,1,2} = 146,0kN$$

Kran 2

$$F_{c,2,1,1} = \varphi_1 * R_g + \varphi_6 * R_{p,dyn,2,1,1} = 1,1 * 32,34kN + 1,03 * 113,3kN$$

$$F_{c,2,1,1} = 152,3kN$$

$$F_{c,2,1,2} = \varphi_1 * R_g + \varphi_6 * R_{p,dyn,2,1,2} = 1,1 * 32,34kN + 1,03 * 101,3kN$$

$$F_{c,2,1,2} = 139,9kN$$

-Statische Prüflast ($\gamma_{F,Test} = 1,1$)

Kran 1

$$F_{c,1,1,1} = R_g + R_{p,sta,1,1,1} = 32,34kN + 128,8kN$$

$$F_{c,1,1,1} = 161,1kN$$

$$F_{c,1,1,2} = R_g + R_{p,stat,1,1,2} = 32,34kN + 115,1kN$$

$$F_{c,1,1,2} = 147,4kN$$

Kran 2

$$F_{c,2,1,1} = R_g + R_{p,stat,2,1,1} = 32,34kN + 128,8kN$$

$$F_{c,2,1,1} = 161,1kN$$

$$F_{c,2,1,2} = R_g + R_{p,stat,2,1,2} = 32,34kN + 115,1kN$$

$$F_{c,2,1,2} = 147,4kN$$

Lastgruppe 9

Kran 1

$$F_{d,1,1,1} = 1,0 * R_g + 1,0 * R_{h,1,1,1} = 1,0 * 32,34kN + 1,0 * 103,03kN$$

$$F_{d,1,1,1} = 135,41kN$$

$$F_{d,1,1,2} = 1,0 * R_g + 1,0 * R_{h,1,1,2} = 1,0 * 32,34kN + 1,0 * 92,1kN$$

$$F_{d,1,1,2} = 124,48kN$$

Kran 2

$$F_{d,2,1,1} = 1,0 * R_g + 1,0 * R_{h,2,1,1} = 1,0 * 32,34kN + 1,0 * 103,03kN$$

$$F_{d,2,1,1} = 135,41kN$$

$$F_{d,2,1,2} = 1,0 * R_g + 1,0 * R_{h,2,1,2} = 1,0 * 32,34kN + 1,0 * 92,1kN$$

$$F_{d,2,1,2} = 124,48kN$$

4.2.4.2 charakteristische Werte der horizontalen Radlasten

Definition der Radlasten: $H_{a,...} \triangleq$ horizontale Radlast für Lastgruppe 1

$H_{b,...} \triangleq$ horizontale Radlast für Lastgruppe 5

$H_{c,...} \triangleq$ horizontale Radlast für Lastgruppe 8

$H_{d,...} \triangleq$ horizontale Radlast für Lastgruppe 9

Lastgruppe 1: Kran 1

$$H_{a,1,1,1} = \varphi_5 * H_{M,1,1,1} = 1,5 * 12,41kN = 18,62kN$$

$$H_{a,1,1,2} = \varphi_5 * H_{M,1,1,2} = 1,5 * (-12,41kN) = -18,62kN$$

Kran 2

$$H_{a,2,1,1} = \varphi_5 * H_{M,2,1,1} = 1,5 * 12,41kN = 18,62kN$$

$$H_{a,2,1,2} = \varphi_5 * H_{M,2,1,2} = 1,5 * (-12,41kN) = -18,62kN$$

Lastgruppe 2: nicht maßgebend

Lastgruppe 3: nicht maßgebend

Lastgruppe 4: nicht maßgebend

Lastgruppe 5: Kran 1

$$H_{b,1,1,1} = 1,0 * H_{S,1,1,1} = 1,0 * 0 = 0$$

$$H_{b,1,1,2} = 1,0 * H_{S,1,1,1} = 1,0 * (-33,43kN) = -33,43kN$$

Kran 2

$$H_{b,2,1,1} = 1,0 * H_{S,2,1,1} = 1,0 * 0 = 0$$

$$H_{b,2,1,2} = 1,0 * H_{S,2,1,1} = 1,0 * (-33,43kN) = -33,43kN$$

Lastgruppe 6: nicht maßgebend

Lastgruppe 7: keine Horizontallasten

Lastgruppe 8: Kran 1

(dynamisch) $H_{c,1,1,1} = \varphi_5 * H_{M,1,1,1} = 1,5 * 12,41kN = 18,62kN$

$$H_{c,1,1,2} = \varphi_5 * H_{M,1,1,2} = 1,5 * (-12,41kN) = -18,62kN$$

Kran 2

$$H_{c,2,1,1} = \varphi_5 * H_{M,2,1,1} = 1,5 * 12,41kN = 18,62kN$$

$$H_{c,2,1,2} = \varphi_5 * H_{M,2,1,2} = 1,5 * (-12,41kN) = -18,62kN$$

Lastgruppe 9: $H_B = H_{d,1,1,1} = \varphi_7 * 21,9kN = 1,25 * 21,9kN = 27,4kN$

a) Lastgruppe 1

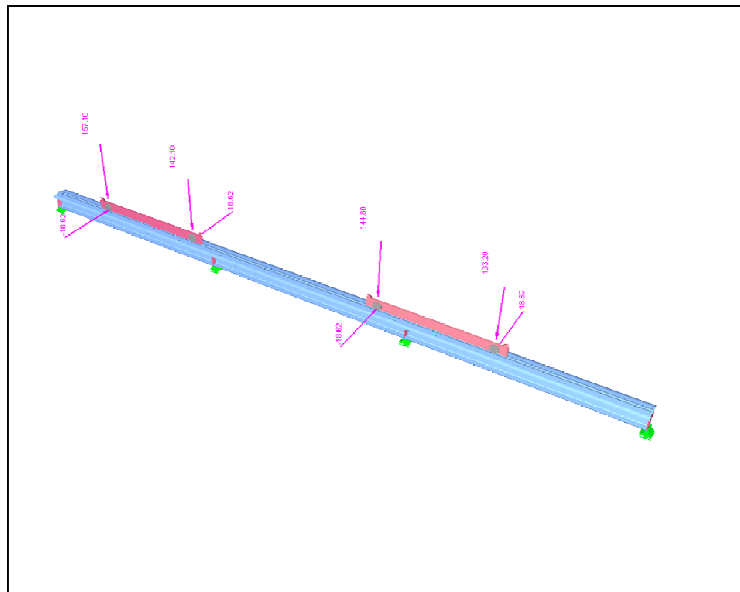


Abbildung 9: charakteristische Lasten der Lastgruppe 1, Abbildung aus [12]

b) Lastgruppe 5

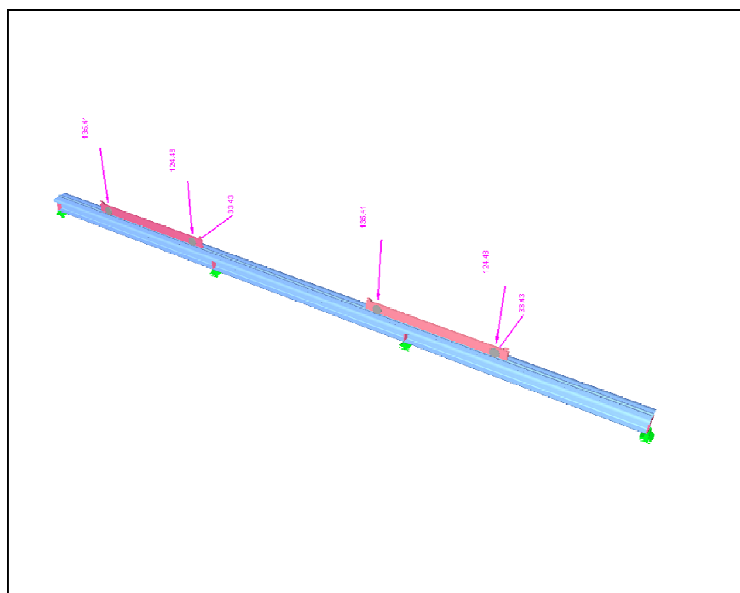


Abbildung 10: charakteristische Lasten der Lastgruppe 5, Abbildung aus [12]

4.3 Einwirkungskombinationen und Schnittgrößen infolge Kranüberfahrt

Tabelle 25: empfohlene Werte für γ -Faktoren, EC1-3, Tab. A.1, siehe [3], Kap. A.2.2

Einwirkung	Symbol	Situation	
		P/T	A
Ständige Kraneinwirkung			
– ungünstig	γ_{Gsup}	1,35	1,00
– günstig	γ_{Ginf}	1,00	1,00
Veränderliche Kraneinwirkung			
– ungünstig	γ_{Qsup}	1,35	1,00
– günstig	γ_{Qinf}		
Kran vorhanden		1,00	1,00
Kran nicht vorhanden		0,00	0,00
Andere veränderliche Einwirkungen	γ_Q		
– ungünstig		1,50	1,00
– günstig		0,00	0,00
Außergewöhnliche Einwirkung	γ_A		1,00

-Einwirkungskombination 1:

$$EK1 = \gamma_G * \text{Eigengewicht KBT} + \gamma_Q * LG1 = 1,35 * \text{Eigengewicht KBT} + 1,35 * LG1$$

Tabelle 26: Minima und Maxima der Schnittkräfte bei verschiedenen Laststellungen für die EK1

	$[kN]/[kNm]/[kNm^2]$	x [m]
max V_y	19,49	4,35
min V_y	-13,70	3,00
max V_z	324,00	0,00
min V_z	-442,80	6,00
max M_T	7,54	0,00
min M_T	-8,59	5,89
max M_y	531,60	3,00
max M_z	39,86	3,60
min M_z	-41,23	3,00
max M_ω	7,95	3,00
min M_ω	-8,16	3,60
max M_{Tpri}	3,28	6,00
min M_{Tpri}	-3,67	6,00
max M_{Tsek}	4,93	4,35
min M_{Tsek}	-6,15	5,89

-Einwirkungskombination 5:

$$EK5 = \gamma_G * \text{Eigengewicht KBT} + \gamma_Q * LG5 = 1,35 * \text{Eigengewicht KBT} + 1,35 * LG5$$

Tabelle 27: Minima und Maxima der Schnittkräfte bei verschiedenen Laststellungen für die EK5

	[kN]/[kNm]/[kNm ²]	x [m]
max V _y	53,16	0,75
min V _y	-42,47	4,54
max V _z	337,20	0,00
min V _z	-399,20	6,00
max M _T	16,18	0,00
min M _T	-14,05	5,89
max M _y	483,00	2,89
max M _z		
min M _z	-78,02	3,00
max M _ω	13,78	3,00
min M _ω		
max M _{Tpri}	5,76	0,00
min M _{Tpri}	-5,60	6,00
max M _{Tsek}	11,12	0,75
min M _{Tsek}	-10,45	5,89

4.4 Allgemeine Querschnittswerte

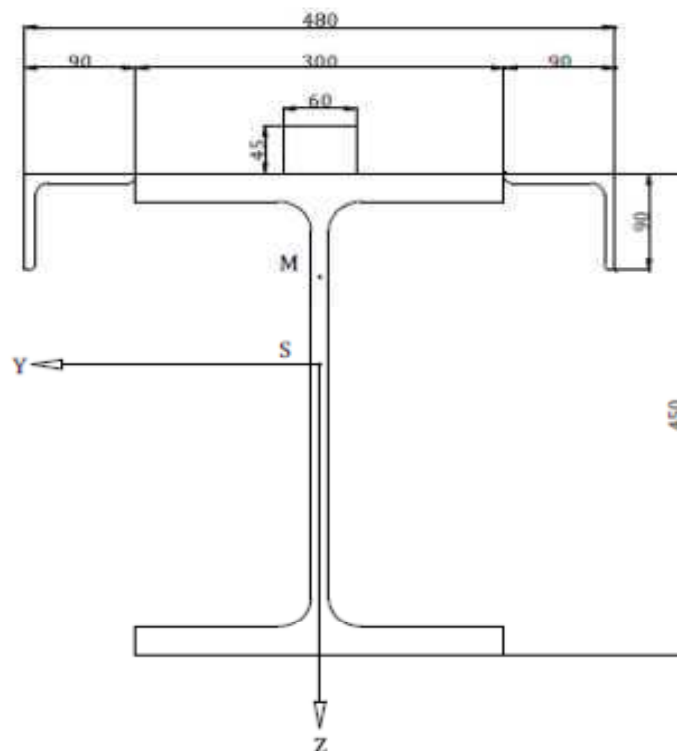


Abbildung 11: Querschnitt des Kranbahnträgers, eigene Zeichnung mit [14]

Tabelle 28: Querschnittswerte des Kranbahnträgers

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Querschnittsfläche	A	276,000	cm^2
Schubfläche	A_y	123,430	cm^2
Schubfläche	A_z	58,090	cm^2
Schwerpunktabstand	e_z	-223,400	mm
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grades)	I_y	103056,000	cm^4
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grades)	I_z	26309,500	cm^4
Polares Trägheitsmoment	I_p	129365,000	cm^4
Trägheitsradius	i_y	193,200	mm
Trägheitsradius	i_z	97,600	mm
Polarer Trägheitsradius	i_p	216,500	mm
Querschnittsgewicht	G	216,700	kg/m
Mantelfläche	U	2,804	m^2/m
Torsionsträgheitsmoment	I_t	632,810	cm^4
Schubmittelpunkt-Lage bezogen auf S	z_M	-82,200	mm
Wölbwiderstand bezogen auf M	I_ω	8927000,000	cm^6
Abklingfaktor	λ	0,001	$1/mm$
Widerstandsmoment	$W_{y,max}$	3793,960	cm^3
Widerstandsmoment	$W_{y,min}$	-4613,700	cm^3
Widerstandsmoment	W_z	1096,230	cm^3
Wölbwiderstandsmoment	W_ω	17461,100	cm^4
Statisches Moment	S_y	2504,110	cm^3
Statisches Moment	S_z	625,490	cm^3
Wölbordinate	ω	511,260	cm^2
Wölbfläche (Flächenmoment 1. Grades mit ω)	S_ω	9969,570	cm^4
Kindem'sche Querschnittsstrecke	$r_{y.Kindem}$	61,800	mm
Querschnittsstrecke	$r_{M,z}$	226,200	mm
Lage der Flächenhalbierenden bez. auf S	f_z	-120,100	mm
Plastisches Widerstandsmoment	$W_{pl,y}$	4714,010	cm^3
Plastisches Widerstandsmoment	$W_{pl,z}$	1905,030	cm^3
Plastischer Formbeiwert	$\alpha_{pl,y,max}$	1,248	
Plastischer Formbeiwert	$\alpha_{pl,z,max}$	1,738	
Knicklinie nach EC	KL_y	c	
Knicklinie nach EC	KL_z	d	

4.5 Nachweis der Tragfähigkeit

4.5.1 Klassifizierung des Kranbahnträgerquerschnitts

Tabelle 29: c/t - Verhältnisse des Kranbahnträgers, berechnet mit [12]

(c/t)- Teil Nr.	Gelagert Form	c [mm]	t [mm]	c/t [-]	Koordinaten Anfang		Koordinaten Ende		Mittlere statische Momente	
					y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]	S_y [cm ³]	S_z [cm ³]
1	Beidseitig	191,5	19,6	9,77	-34,0	-178,4	-225,5	-178,4	435,51	416,15
2	Beidseitig	191,5	19,6	9,77	34,0	-178,4	225,5	-178,4	435,51	416,15
3	Einseitig	116,0	26,0	4,46	-34,0	271,6	-150,0	271,6	366,72	166,75
4	Einseitig	116,0	26,0	4,46	34,0	271,6	150,0	271,6	366,72	166,75
5	Beidseitig	344,0	14,0	24,57	0,0	-125,4	0,0	218,6	2419,40	0,00
6	Einseitig	75,5	9,0	8,39	-240,0	-163,9	-240,0	-88,4	34,78	73,78
7	Einseitig	75,5	9,0	8,39	240,0	-163,9	240,0	-88,4	34,78	73,78

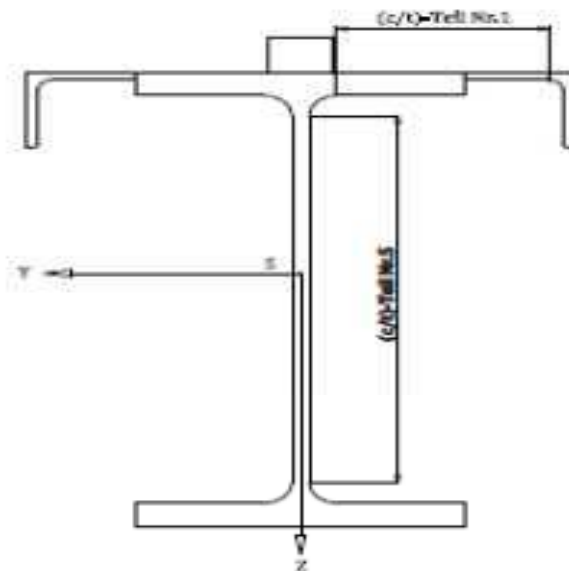


Abbildung 12: c/t -Verhältnisse des Kranbahnträgers, eigene Zeichnung mit [14]

Tabellen: siehe Anhang 1

Steg auf Biegung beansprucht [Nr.5]: $\frac{c}{t} = 24,57 < 72\varepsilon = 72 \rightarrow$ Querschnittsklasse 1

Flansch auf Druck beansprucht [Nr.1]: $\frac{c}{t} = 9,77 < 33\varepsilon = 26,73 \rightarrow$ Querschnittsklasse 1

=> Der auf Biegung beanspruchte Querschnitt ist der Querschnittsklasse 1 zuzuordnen

4.5.2 Querschnittsnachweise des Kranbahnträgers

BDK-Nachweis als Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung

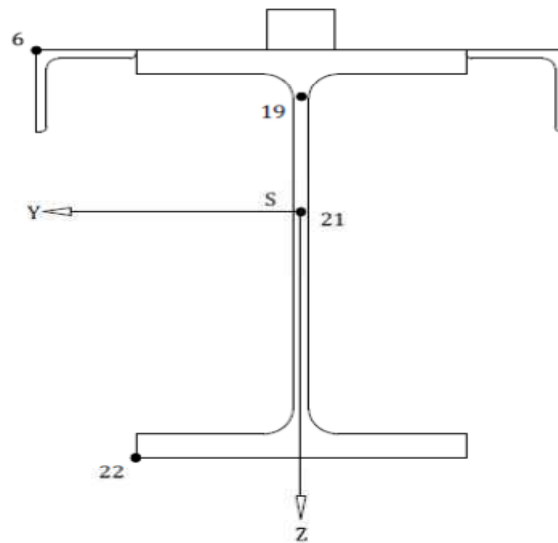


Abbildung 13: maßgebende Spannungspunkte, eigene Zeichnung mit [14]

4.5.2.1 Nachweis für die Einwirkungskombination 1

-Normalspannung σ_x

maßgebende Stelle im Stab: $x = 3,0m$

maßgebender Spannungspunkt: 22

maximale Normalspannung: $\sigma_{x,Ed} = 18,0kN/cm^2$

Grenz-Normalspannung: $\sigma_{x,Rd} = 23,5kN/cm^2$

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = \frac{18,0kN/cm^2}{23,5kN/cm^2} = 0,77 \leq 1,0$$

-Normalspannung σ_z

maßgebende Stelle im Stab: $x = 3,0m$

maßgebender Spannungspunkt: 19

maximale Normalspannung: $\sigma_{z,Ed} = -6,16kN/cm^2$

Grenz-Normalspannung: $\sigma_{z,Rd} = 23,5kN/cm^2$

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{z,Ed}}{\sigma_{z,Rd}} = \frac{6,16kN/cm^2}{23,5kN/cm^2} = 0,26 \leq 1,0$$

-Schubspannung τ_x

maßgebende Stelle im Stab: $x = 3,0m$

maßgebender Spannungspunkt: 21

maximale Schubspannung: $\tau_{Ed} = 8,23kN/cm^2$

Grenz-Schubspannung: $\tau_{Rd} = \frac{23,5kN/cm^2}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 13,6kN/cm^2$

Nachweis:

$$\frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} = \frac{8,23kN/cm^2}{13,6kN/cm^2} = 0,61 \leq 1,0$$

-Vergleichsspannung σ_v

maßgebende Stelle im Stab: $x = 3,0m$

maßgebender Spannungspunkt: 22

maximale Vergleichsspannung: $\sigma_v = 18,01kN/cm^2$

Grenz-Vergleichsspannung: $\sigma_{v,grenz} = 23,5kN/cm^2$

Nachweis:

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_{v,Grenz}} = \frac{18,01kN/cm^2}{23,5kN/cm^2} = 0,77 \leq 1,0$$

4.5.2.2 Nachweis für die Einwirkungskombination 5

-Normalspannung σ_x

maßgebende Stelle im Stab: $x = 3,0m$

maßgebender Spannungspunkt: 6

maximale Normalspannung: $\sigma_{x,Ed} = -18,35kN/cm^2$

Grenz-Normalspannung: $\sigma_{x,Rd} = 23,5kN/cm^2$

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = \frac{18,35kN/cm^2}{23,5kN/cm^2} = 0,78 \leq 1,0$$

-Normalspannung σ_z

maßgebende Stelle im Stab: $x = 3,0m$

maßgebender Spannungspunkt: 19

maximale Normalspannung: $\sigma_{z,Ed} = -5,31kN/cm^2$

Grenz-Normalspannung: $\sigma_{z,Rd} = 23,5kN/cm^2$

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{z,Ed}}{\sigma_{z,Rd}} = \frac{5,31kN/cm^2}{23,5kN/cm^2} = 0,23 \leq 1,0$$

-Schubspannung τ_x

maßgebende Stelle im Stab: $x = 3,0m$

maßgebender Spannungspunkt: 21

maximale Schubspannung: $\tau_{Ed} = 7,73kN/cm^2$

Grenz-Schubspannung: $\tau_{Rd} = \frac{23,5kN/cm^2}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 13,6kN/cm^2$

Nachweis:

$$\frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} = \frac{7,73kN/cm^2}{13,6kN/cm^2} = 0,57 \leq 1,0$$

-Vergleichsspannung σ_v

maßgebende Stelle im Stab: $x = 3,0m$

maßgebender Spannungspunkt: 6

maximale Vergleichsspannung: $\sigma_v = 18,38kN/cm^2$

Grenz-Vergleichsspannung: $\sigma_{v,grenz} = 23,5kN/cm^2$

Nachweis:

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_{v,Grenz}} = \frac{18,38kN/cm^2}{23,5kN/cm^2} = 0,78 \leq 1,0$$

4.5.3 BDK-Nachweis als Querschnittsnachweis (Alternativ) nach EC3-1-1

Tabelle 30: Bemessung der Vorkrümmung e_0/L von Bauteilen, EC3-1-1, Tab. 5.1, siehe [4], Kap. 5.3.2

	elastische Berechnung	plastische Berechnung
	$e_{0,d}/L$	$e_{0,d}/L$
a_0	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

Ersatzimperfektion: Imperfektionsbeiwert siehe Anhang 3

Auswahl der Knicklinie siehe Anhang 2

$$e_0 = l/450 = 1,333\text{cm} \text{ (automatisch nach [12] für Knicklinie d)}$$

-Widerstandsgrößen:

Max. plastische Biegemomente:

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{w_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4714,01\text{cm}^3 * 23,5\text{kN/cm}^2}{1,0} = 1107,8\text{kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{w_{pl,z} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1905,03\text{cm}^3 * 23,5\text{kN/cm}^2}{1,0} = 447,7\text{kNm}$$

vollplastisches Wölbmoment:

$$M_{pl,\omega,Rd} = 64,46\text{kNm}^2 \text{ (berechnet mit [13])}$$

-Wölbkrafttorsion Theorie II. Ordnung, EK1, LG134, Stelle $x = 3,0m$

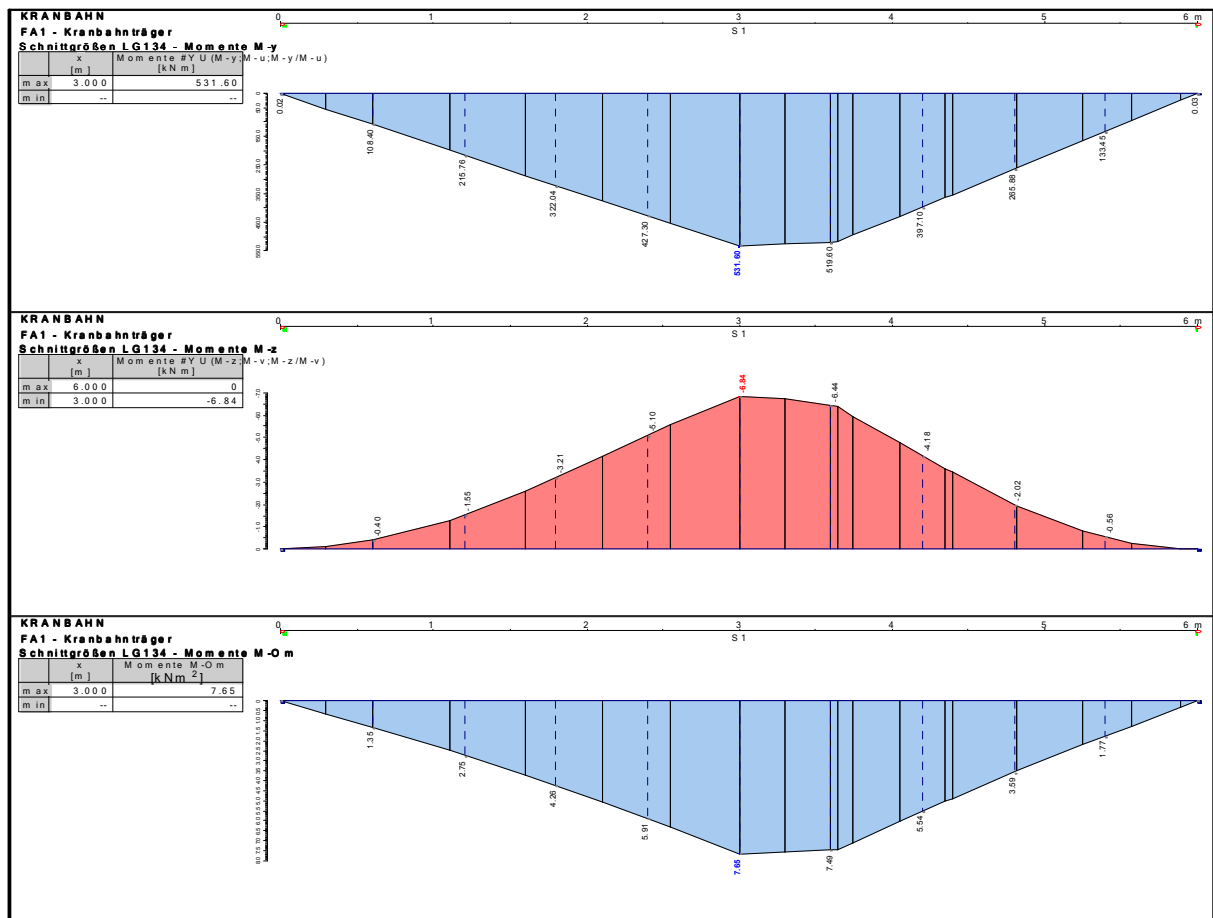


Abbildung 14: Momentendarstellung für die EK1, Lastgruppe 134, Abbildung aus [12]

$$M_{y,Ed} = 531,6kNm$$

$$M_{z,Ed} = 6,85kNm$$

$$M_{\omega,Ed} = 7,65kNm^2$$

Nachweis:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right)^2 + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} + \frac{M_{\omega,Ed}}{M_{pl,\omega,Rd}} \leq 1,0$$

$$\left(\frac{531,6kNm}{1107,8kNm} \right)^2 + \frac{6,85kNm}{447,7kNm} + \frac{7,65kNm^2}{64,46kNm^2} = 0,36 < 1,0$$

-Wölbkrafttorsion Theorie II. Ordnung, EK5, LG135, Stelle $x = 3,0m$

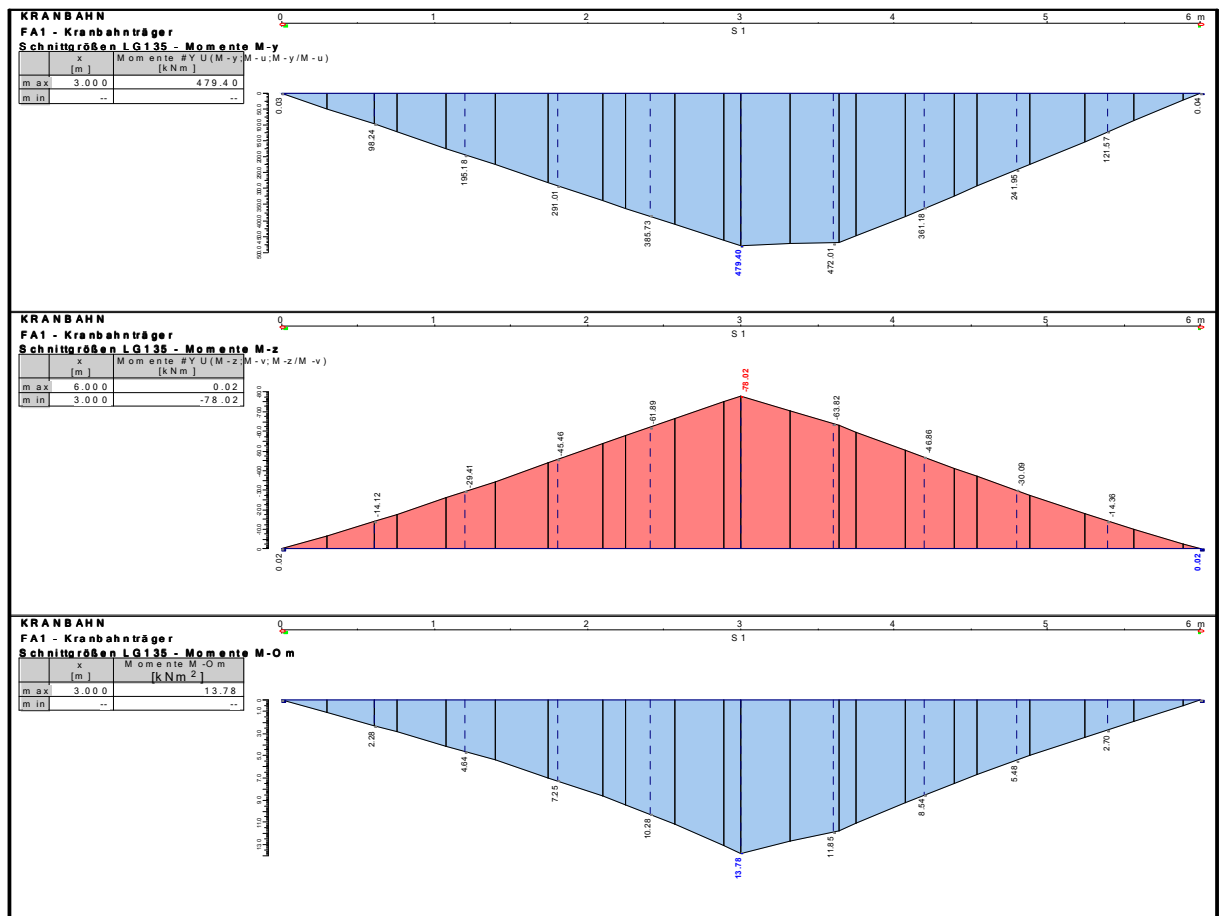


Abbildung 15: Momentendarstellung für die EK5, Lastgruppe 135, Abbildung aus [12]

$$M_{y,Ed} = 479,4 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 78,02 \text{ kNm}$$

$$M_{\omega,Ed} = 13,78 \text{ kNm}^2$$

Nachweis:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right)^2 + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} + \frac{M_{\omega,Ed}}{M_{pl,\omega,Rd}} \leq 1,0$$

$$\left(\frac{479,4 \text{ kNm}}{1107,8 \text{ kNm}} \right)^2 + \frac{78,02 \text{ kNm}}{447,7 \text{ kNm}} + \frac{13,78 \text{ kNm}^2}{64,46 \text{ kNm}^2} = 0,58 < 1,0$$

4.6 Lokale Nachweise

4.6.1 Lasteinleitungsspannungen

a) Lastausbreitungslänge am Übergang Ausrundungsradius-Steg

vgl. Tabelle 10: effektive Lastausbreitungslänge l_{eff} , EC3-6, Tab. 5.1, siehe [8], Kap. 5.7.1

Fall	Beschreibung	Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}
(a)	Kranschiene schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [I_{ff} / t_w]^{1/3}$
(b)	Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$
(c)	Kranschiene auf einer mind. 6mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage	$l_{eff} = 4,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$

I_{rf} Trägheitsmoment um die horizontale Schwerachse des zusammen gesetzten Querschnitts einschließlich der Schiene und des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}

I_r Eigenträgheitsmoment der Schiene um ihre horizontale Schwerachse

$I_{f,eff}$ Eigenträgheitsmoment des Oberflansches um seine horizontale Schwerachse mit der effektiven Breite b_{eff}

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f \leq b$$

mit: h_r Höhe der abgenutzten Schiene

t_f Flanschdicke

b Gesamtbreite des Obergurtes

Fall (a) gewählt:

$b_{fr} = 6cm$ (Schienenfußbreite) Schiene 60x60 (75%) $\rightarrow h_r = 4,5cm$

$$h_r + t_f = 4,5cm + 2,6cm = 7,1cm$$

(Abstand zwischen Schienenoberkante und Flanschunterkante)

-Effektive Breite: $b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f = 6cm + 7,1cm = 13,1cm < b = 30cm$

Flächenträgheitsmoment des Obergurtes (rot umrandet) um die horizontale Achse, Schiene angeschweißt, d.h. starr mit dem Obergurt verbunden

$$I = 254,55cm^4$$

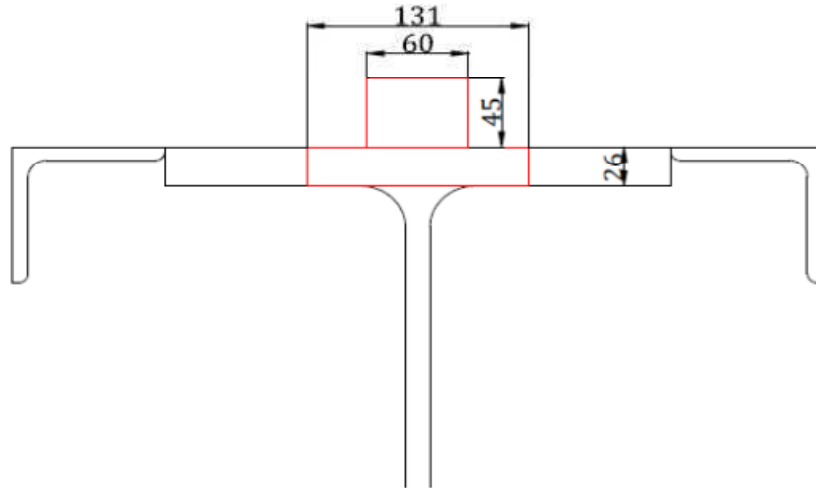


Abbildung 16: effektiver Obergurt für die Berechnung der Lasteinleitungsbreite, eigene Zeichnung mit [14]

-Effektive Länge: $l_{eff} = 3,25 * \left(\frac{I}{t_w}\right)^{\frac{1}{3}} = 3,25 * \left(\frac{254,55cm^4}{1,4cm}\right)^{\frac{1}{3}} = 18,4cm$

-Lasteinleitungslänge an der Stegoberkante: $l_{eff} + 2r = 18,4cm + 2 * 2,7cm = 23,8cm$

b) Stegpressung am Übergang Ausrundungsradius-Steg

-Stegpressung:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{t_w * (l_{eff} + 2r)} = \frac{1,35 * 157,1kN}{1,4cm * 23,8cm} = -6,37kN/cm^2$$

-Zugehörige lokale Schubspannung:

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,2 * \sigma_{oz,Ed} = 0,2 * 6,37kN/cm^2 = 1,27kN/cm^2$$

-Nachweise

$$\frac{|\sigma_{oz,Ed}|}{f_y/\gamma_{M0}} = \frac{6,37kN/cm^2}{\frac{23,5kN/cm^2}{1,0}} = 0,27 < 1,0$$

$$\frac{|\tau_{oxz,Ed}|}{f_y/(\gamma_{M0} * \sqrt{3})} = \frac{1,27kN/cm^2}{\frac{23,5kN/cm^2}{1,0 * \sqrt{3}}} = 0,09 < 1,0$$

4.6.2 Beulnachweis

4.6.2.1 Beulnachweis für einzelne Radlast

Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast von EK1

-starre Lasteinleitung: $s_s = l_{eff} - 2 * t_f = 18,4cm - 2 * 2,6cm = 13,2cm$

-Beulfeldmaße: Länge: $a = 600cm$

Höhe: $h_w = h - 2 * t_f = 45cm - 2 * 2,6cm = 39,8cm$

Dicke: $t_w = 1,4cm$

-Beulwert: $k_F = 6 + 2 * \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 = 6 + 2 * \left(\frac{39,8cm}{600cm}\right)^2 = 6,01$

-kritische Beullast: $F_{cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 * 6,01 * 21000kN/cm^2 * \frac{(1,4cm)^3}{39,8cm} = 7831,4kN$

-Hilfswerte für die Berechnung der Quetschgrenze

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w} = \frac{30cm}{1,4cm} = 21,43$$

$$m_2 = 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 = 0,02 * \left(\frac{39,8cm}{2,6cm}\right)^2 = 4,69 \quad \text{gilt für } \bar{\lambda} > 0,5$$

$$l_y = s_s + 2 * t_f * (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 13,2cm + 2 * 2,6cm * (1 + \sqrt{21,43 + 4,69}) = 39,8cm$$

-Quetschgrenze: $F_y = f_y * t_w * l_y = 23,5kN/cm^2 * 1,4cm * 39,8cm = 1308,8kN$

-Schlankheitsparameter: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{1308,8kN}{7831,4kN}} = 0,41 < 0,5$

-> Modifikation von m_2 erforderlich

$$m_2 = 0 \quad \text{gilt für } \bar{\lambda} < 0,5$$

$$l_y = s_s + 2 * t_f * (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 13,2cm + 2 * 2,6cm * (1 + \sqrt{21,43 + 0}) = 42,5cm$$

-Quetschgrenze: $F_y = f_y * t_w * l_y = 23,5kN/cm^2 * 1,4cm * 42,5cm = 1397,3kN$

-Schlankheitsparameter: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{1397,3kN}{7831,4kN}} = 0,42$

-Abminderungsfaktor: $\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}} = \frac{0,5}{0,42} = 1,19$ maximal zulässiger Wert: $\chi_F = 1,0$

$$L_{eff} = \chi_F * l_y = 1,0 * 42,5cm = 42,5cm$$

-Beulnachweis für Querspannungen

$$\eta_2 = \frac{F_{z,Ed} * \gamma_{M1}}{f_y * L_{eff} * t_w} = \frac{1,35 * 157,1 * 1,1}{23,5kN/cm^2 * 42,5cm * 1,4cm} = 0,17 < 1,0$$

-Beulnachweis für Biegespannungen

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed} * \gamma_{M1}}{f_y * W_{y,el}} = \frac{53160 \text{ kNcm} * 1,1}{23,5 \text{ kN/cm}^2 * 3793,96 \text{ cm}^3} = 0,66 < 1,0$$

-Interaktion von Biege- und Querspannungen

$$\eta_2 + 0,8 * \eta_1 = \gamma_{M1} (0,15 + 0,8 * 0,6) = 0,69 < 1,4$$

-Durch Flansch induziertes Beulen

-> Kriterium: $\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_y} * \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$

$$k = 0,55 \text{ (wenn nur die elastischen Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt wird)}$$

$$A_w = h_w * t_w \text{ Stegfläche}$$

$$A_{fc} \text{ Fläche des Druckflansches}$$

$$\frac{39,8 \text{ cm}}{1,4 \text{ cm}} \leq 0,55 * \frac{21000 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} * \sqrt{\frac{(39,8 \text{ cm} * 1,4 \text{ cm})}{(30 \text{ cm} * 2,6 \text{ cm} + 2 * 15,5 \text{ cm}^2)}}$$

$$28,4 \leq 319,5$$

4.6.2.2 Beulnachweis für zwei nah beieinanderliegende Radlasten (EK1)

-starre Lasteinleitung: $s_s = 64 \text{ cm}$

-Beulfeldmaße: Länge: $a = 600 \text{ cm}$

$$\text{Höhe: } h_w = 45 \text{ cm} - 2 * 2,6 \text{ cm} = 39,8 \text{ cm}$$

$$\text{Dicke: } t_w = 1,4 \text{ cm}$$

-Beulwert: $k_F = 6,01$

-kritische Beullast: $F_{cr} = 7831,4 \text{ N}$

-Hilfswerte: $m_1 = 21,43$

$$m_2 = 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 = 0,02 * \left(\frac{39,8 \text{ cm}}{2,6 \text{ cm}}\right)^2 = 4,69 \quad \text{gilt für } \bar{\lambda} > 0,5$$

$$l_y = s_s + 2 * t_f * (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 64 \text{ cm} + 2 * 2,6 \text{ cm} * (1 + \sqrt{21,43 + 4,69}) = 95,8 \text{ cm}$$

-Quetschgrenze: $F_y = f_y * t_w * l_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2 * 1,4 \text{ cm} * 95,8 \text{ cm} = 3151,8 \text{ kN}$

-Schlankheitsparameter: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{3151,8 \text{ kN}}{7831,4 \text{ kN}}} = 0,63 > 0,5$

-Abminderungsfaktor: $\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}} = \frac{0,5}{0,63} = 0,79$

$$L_{eff} = \chi_F * l_y = 0,79 * 95,8 \text{ cm} = 76,0 \text{ cm}$$

-Beulnachweis für Querspannungen

$$\eta_2 = \frac{F_{z,Ed} * \gamma_{M1}}{f_y * L_{eff} * t_w} = \frac{1,35 * (157,1 + 142,1kN) * 1,1}{23,5kN/cm^2 * 76,0cm * 1,4cm} = 0,18 < 1,0$$

-Beulnachweis für Biegespannungen

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed} * \gamma_{M1}}{f_y * W_{y,el}} = \frac{53160kNcm * 1,1}{23,5kN/cm^2 * 3793,96cm^3} = 0,66 < 1,0$$

-Interaktion von Biege- und Querspannungen

$$\eta_2 + 0,8 * \eta_1 = \gamma_{M1}(0,16 + 0,8 * 0,6) = 0,7 < 1,4$$

4.7 Einzelnachweise

4.7.1 Nachweis der Schienenschweißnaht

Grenzwert Schweißnahtdicke:

$$\begin{aligned} a = 10mm & \geq 5mm \quad \text{für } t \geq 30mm \\ & \leq 0,7 * \min t = 0,7 * 26mm = 18,2mm \\ & \geq \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{60mm} - 0,5 = 7,2mm \end{aligned}$$

Grenzwert Schweißnahtlänge:

$$\begin{aligned} L_w = l_{eff} = 140mm & \geq 30mm \\ & \geq 6 * a_w = 6 * 10mm = 60mm \end{aligned}$$

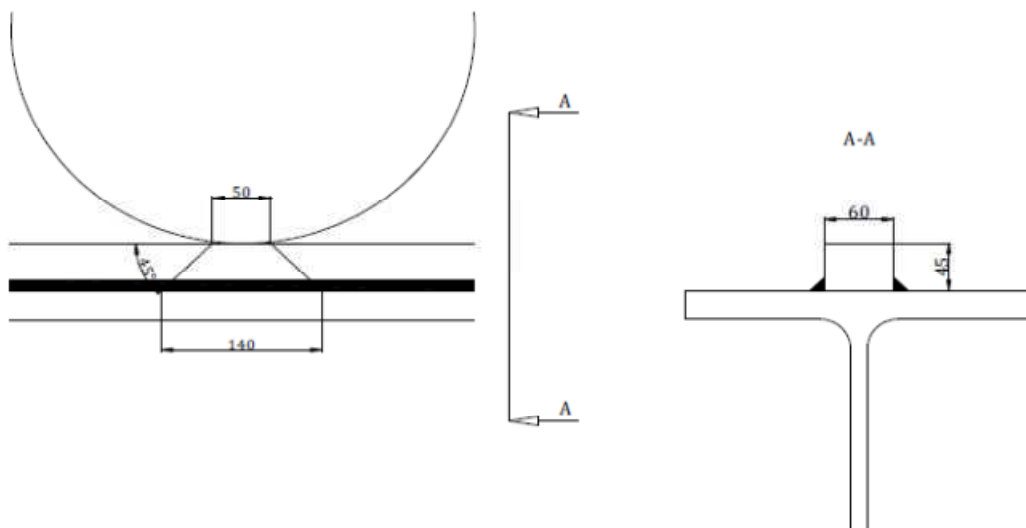


Abbildung 17: Lastangriffsfläche Oberkante Obergurt, eigene Zeichnung mit [14]

Lastangriffslänge: $l = 2 * h_s * \tan \kappa + 0,2 * r_{LD} = 2 * 45mm * \tan 45^\circ + 0,2 * 250mm$

$$l = 14cm$$

mit h_s ...abgenutzte Schienenhöhe

r_{LD} ...Laufraddurchmesser

Schweißnahtfläche: $A_w = \Sigma a * l_{eff} = 2 * 1,0cm * 14cm = 28cm^2$

Tabelle 31: Korrelationsbeiwerte β_w für Kehlnähte, EC3-1-8, Tab. 4.1, siehe [6], Kap. 4.5.3.2

Norm und Stahlsorte			Korrelationsbeiwert β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0

Korrelationsbeiwert für S 235: $\beta_w = 0,8$

Nachweis: $\frac{F_{w,Ed}}{F_{w,Rd}} \leq 1,0$

$$F_{w,Ed} = 1,35 * \frac{\max F}{l_{eff}} = 1,35 * \frac{157,1kN}{14cm} = 15,15kN/cm$$

$$F_{w,Rd} = \left(\frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}}}{\beta_w * \gamma_{M2}} \right) * a = \left(\frac{\frac{36,0kN/cm^2}{\sqrt{3}}}{0,8 * 1,25} \right) 1,0cm = 20,8kN/cm$$

$$\frac{15,15kN/cm}{20,8kN/cm} = 0,73 < 1,0$$

4.7.2 Nachweis der Träger-Winkel Schweißnaht für das maximale Biegemoment (globale Tragwirkung)

-Stumpfnah mit $t = a = 9mm$

-Spannung in der Schweißnahtmitte: mit $\max M_y = 531,6kNm$ aus EK1

$$\sigma_{w,m} = \frac{M_y}{I_y} * z = \frac{53160kNcm}{103056cm^4} * (-17,39cm) = -8,97kN/cm^2$$

-Nachweis:

$$f_{v,w,d} = \frac{f_{u,k}}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M,w}} = \frac{36,0kN/cm^2}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,8kN/cm^2$$

$$\frac{8,97kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,43 < 1,0$$

4.7.3 Nachweis der Stirnplattenschweißnaht (HEB 450 – Blech 25)

Grenzwert Schweißnahtdicke:

$$\begin{aligned} a = 6mm & \geq 3mm \\ & \leq 0,7 * \min t = 0,7 * 14mm = 9,8mm \\ & \geq \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{26mm} - 0,5 = 4,6mm \end{aligned}$$

Grenzwert Schweißnahtlänge:

$$\begin{aligned} L_{w,Steg} = 344mm & \geq 30mm \\ & \geq 6 * a = 6 * 6mm = 36mm \\ & \leq 150 * a = 150 * 6mm = 900mm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{w,Gurt} = 300mm & \geq 30mm \\ & \geq 6 * a = 6 * 6mm = 36mm \\ & \leq 150 * a = 150 * 6mm = 900mm \end{aligned}$$

Stegschweißnahtfläche: $A_{w,Steg} = A_z = \Sigma a * L_w = 2 * 0,6cm * 34,4cm = 55,04cm^2$

Gurtschweißnahtfläche: $A_{w,Gurt} = A_y = 0,6cm * (2 * 30cm + 4 * 11,6cm) = 63,84cm^2$

Nachweis der maximalen vertikalen Querkraft $\max V_z = 442,05 \text{ kN}$ bei EK1:

$$\tau_{z,w} = \tau_{\parallel} = \frac{\max V_z}{A_z} = \frac{442,05 \text{ kN}}{55,04 \text{ cm}^2} = 8,05 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \sqrt{(8,05 \text{ kN/cm}^2)^2} = 8,05 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sqrt{\tau_{\parallel}^2} \leq f_{v,w,d} \quad f_{v,w,d} \dots \text{Scherfestigkeit der Schweißnaht}$$

$$f_{v,w,d} = \frac{f_{u,k}}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M,w}} = \frac{36,0 \text{ kN/cm}^2}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{8,05 \text{ kN/cm}^2}{20,8 \text{ kN/cm}^2} = 0,39 < 1,0$$

Nachweis der maximale horizontale Querkraft: $\max V_y = 53,16 \text{ kN}$ bei EK5

$$\tau_{y,w} = \tau_{\parallel} = \frac{\max V_y}{A_y} = \frac{53,16 \text{ kN}}{63,84 \text{ cm}^2} = 0,83 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \sqrt{(0,83 \text{ kN/cm}^2)^2} = 0,83 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{0,83 \text{ kN/cm}^2}{20,8 \text{ kN/cm}^2} = 0,04 < 1,0$$

4.7.4 Nachweis der Schraubenverbindung Kranbahnträger-Stütze

- die Verbindung wird als Zugverbindung nach DIN EN 1993-1-8 nachgewiesen

gewählte Schraube: 2x M16x150 5.6 je Stütze, Kategorie D

Tabelle 32: Kategorien von Schraubenverbindungen, EC3-1-8, Tab. 3.2, siehe [6], Kap. 3.4.2

Kategorie	Nachweiskriterium	Anmerkungen
Scherverbindungen		
A Scher-/Lochleibungsverbindung	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Keine Vorspannung erforderlich. Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9 dürfen verwendet werden.
B Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. Gleitwiderstand für Gebrauchstauglichkeit siehe 3.9.
C Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $\langle AC \rangle \Sigma F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd} \langle AC \rangle$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. Gleitwiderstand für Tragfähigkeit siehe 3.9. $N_{net,Rd}$ siehe 3.4.1(1)c).
Zugverbindungen		
D Nicht vorgespannt	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Keine Vorspannung erforderlich. Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9 dürfen verwendet werden. $B_{p,Rd}$ siehe Tabelle 3.4.
E Vorgespannt	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. $B_{p,Rd}$ siehe Tabelle 3.4.

Tabelle 33: Nennwerte der Streckgrenze f_{yb} und der Zugfestigkeit f_{ub} von Schrauben, EC3-1-8, Tab. 3.1, siehe [6], Kap. 3.1.1

Schraubenfestigkeitsklasse	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

Tabelle 34: Grenzwerte für Rand- und Lochabstände, EC3-1-8, Tab. 3.3, siehe [6], Kap. 3.5

Rand- und Lochabstände, siehe Bild 3.1	Minimum	Maximum ^{1), 2), 3)}		
		Stahlkonstruktionen unter Verwendung von Stahlsorten nach EN 10025, ausgenommen Stahlsorten nach EN 10025-5		Stahlkonstruktionen unter Verwendung von Stahlsorten nach EN 10025-5
		Stahl, der dem Wetter oder anderen korrosiven Einflüssen ausgesetzt ist	Stahl, der nicht dem Wetter oder anderen korrosiven Einflüssen ausgesetzt ist	Ungeschützter Stahl
Randabstand e_1	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		Der größte Wert von: $8t$ oder 125 mm
Randabstand e_2	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		Der größte Wert von: $8t$ oder 125 mm
Randabstand e_3 bei Langlöchern	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Randabstand e_4 bei Langlöchern	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Lochabstand p_1	$2,2d_0$	Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm	Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm	Der kleinste Wert von: $14t_{\min}$ oder 175 mm
Lochabstand $p_{1,0}$		Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm		
Lochabstand $p_{1,i}$		Der kleinste Wert von: $28t$ oder 400 mm		
Lochabstand p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm	Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm	Der kleinste Wert von: $14t_{\min}$ oder 175 mm

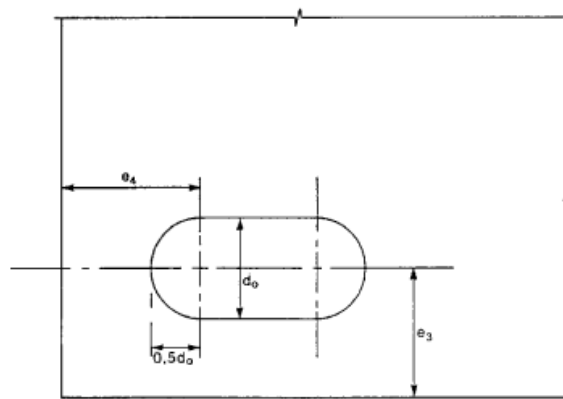


Abbildung 18: Randabstände bei Langlöchern, EC3-1-8, Bild 3.1, siehe [6], Kap. 3.5

-Lochabstände: $e_3 \geq 1,5 * d_0 = 1,5 * 17\text{mm} = 25,5\text{mm}$

gewählt: $e_3 = 160\text{mm}$

$e_4 \geq 1,5 * d_0 = 1,5 * 17\text{mm} = 25,5\text{mm}$

gewählt: $e_4 = 40\text{mm}$

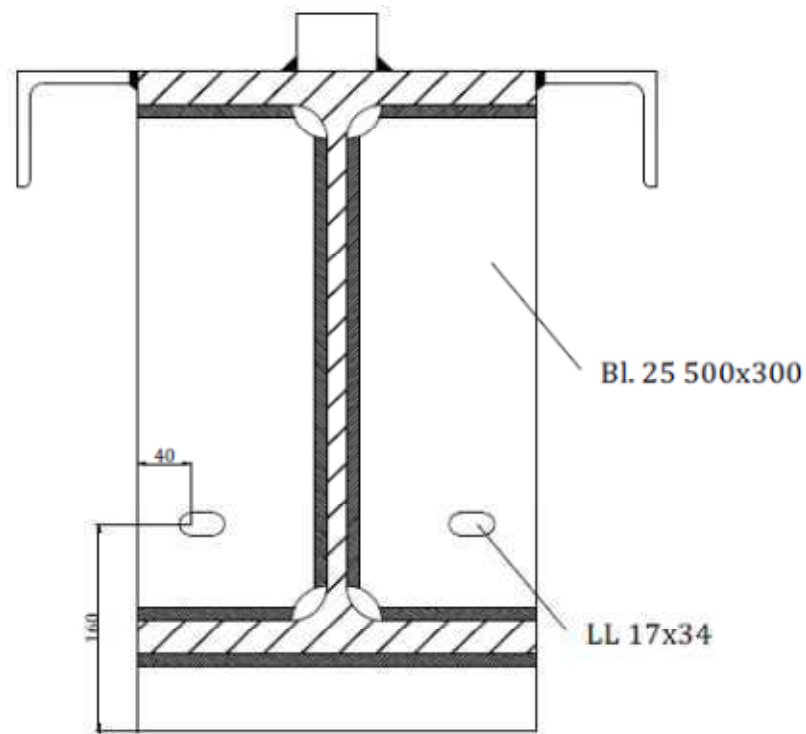


Abbildung 19: Stirnansicht des Kranbahnträgers, eigene Zeichnung mit [14]

-Nachweis der Schrauben auf Zugversagen:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}}$$

mit: $k_2 = 0,9$

$$f_{ub} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$A_s = 157 \text{ mm}^2$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 * 500 \text{ N/mm}^2 * 157 \text{ mm}^2}{1,25} = 56,5 \text{ kN}$$

Nachweis: $\frac{F_{t,Ed}}{n * F_{t,Rd}} < 1,0$

mit: $F_{t,Ed} = 1,5 * 55,88 \text{ kN} = 83,82 \text{ kN}$

$$n = 2 \text{ Schrauben}$$

$$\frac{83,82 \text{ kN}}{2 * 56,5 \text{ kN}} = 0,74 < 1,0$$

4.7.5 Nachweis der Gewindestange zur Einleitung der Horizontalradlast in die Stütze

gewählte Gewindestange: M20x355 5.6

4.7.5.1 Nachweis der Gewindestange auf Zugversagen

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}}$$

mit: $k_2 = 0,9$

$$f_{ub} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$A_s = 245 \text{ mm}^2$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 * 500 \text{ N/mm}^2 * 245 \text{ mm}^2}{1,25} = 88,2 \text{ kN}$$

Nachweis: $\frac{F_{t,Ed}}{n F_{t,Rd}} < 1,0$

mit: $F_{t,Ed} = 1,5 * 33,43 \text{ kN} = 50,15 \text{ kN}$

$$\frac{50,15 \text{ kN}}{88,2 \text{ kN}} = 0,57 < 1,0$$

4.7.5.2 Stabilitätsnachweis der Gewindestange

mit: $A_s = 2,45 \text{ cm}^2$ $r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,45 \text{ cm}^2}{\pi}} = 0,883 \text{ cm}$

$$I = \frac{\pi}{4} * r^4 = \frac{\pi}{4} * (0,883 \text{ cm})^4 = 0,478 \text{ cm}^4$$

Nachweisformel: $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$

mit: $N_{Ed} = 50,15 \text{ kN}$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

mit: $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$

mit: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 * 21000 \text{ kN/cm}^2 * 0,478 \text{ cm}^4}{(0,5 * 35,5 \text{ cm})^2} = 314,4 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{2,45 \text{ cm}^2 * 30 \text{ kN/cm}^2}{314,4 \text{ kN}}} = 0,48$$

mit: $\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$

$\alpha = 0,49$ für Knicklinie c (siehe Anhang 2)

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,48 - 0,2) + 0,48^2] = 0,68$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,68 + \sqrt{0,68^2 - 0,48^2}} = 0,86$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,86 * 2,45 \text{ cm}^2 * 30 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 63,5 \text{ kN}$$

Nachweis: $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{50,15 \text{ kN}}{63,5 \text{ kN}} = 0,79 \leq 1,0$

4.7.6 Nachweis des Endanschlags

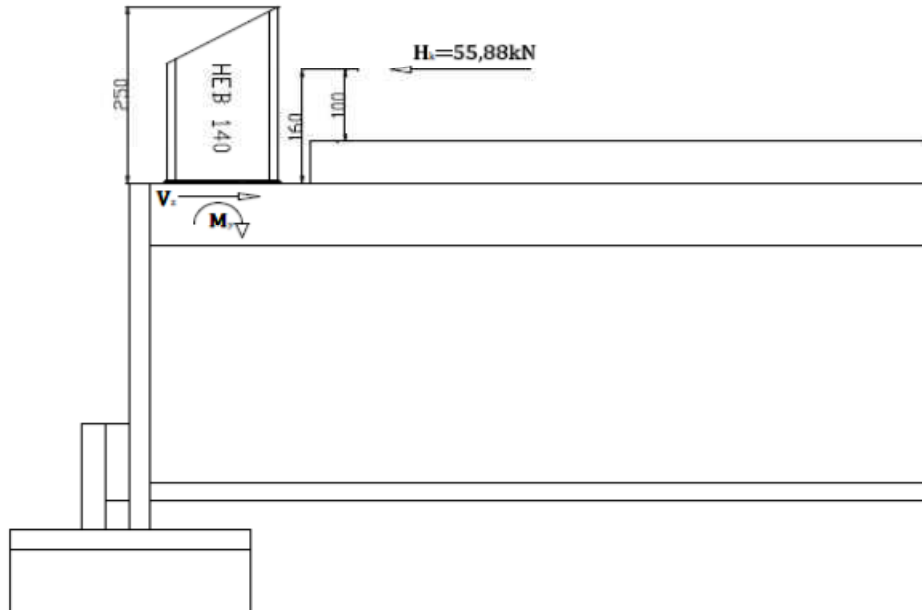


Abbildung 20: graphische Darstellung des Endanschlags, eigene Zeichnung mit [14]

Schnittgrößen an der Schweißnaht:

$$V_{z,Ed} = \gamma_Q * H_k = 1,5 * 55,88 \text{ kN} = 83,82 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = \gamma_Q * H_k * s = 1,5 * 55,88 \text{ kN} * 16 \text{ cm} = 1341 \text{ kNcm}$$

Grenzwert Schweißnahtdicke:

$$\begin{aligned} a &= 5 \text{ mm} & \leq 0,7 * \text{mint} &= 0,7 * 7 \text{ mm} = 4,9 \text{ mm} \\ & & \geq \sqrt{\text{maxt}} - 0,5 &= \sqrt{26 \text{ mm}} - 0,5 = 4,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

Querschnittswerte des Linienquerschnitts des HEB 140:

$$a = 0,5 \text{ cm}, h = 14 \text{ cm}, b = 14 \text{ cm}, t_f = 1,2 \text{ cm}, t_w = 0,7 \text{ cm}, r = 1,2 \text{ cm}, d = 9,2 \text{ cm}$$

Die Nähte im Bereich der Ausrundung werden nicht mit angesetzt.

$$\begin{aligned} A_{w,Gurt} &= A_y = 2 * a * (2 * b + 2 * t_f - 2 * r - t_w) \\ &= 2 * 0,5 \text{ cm} * (2 * 14 \text{ cm} + 2 * 1,2 \text{ cm} - 2 * 1,2 \text{ cm} - 0,7 \text{ cm}) = 29,6 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{w,Steg} = A_z = 2 * a * d = 2 * 0,5 \text{ cm} * 9,2 \text{ cm} = 9,2 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned}
I_y &= \frac{1}{2} * a * b * h^2 + \frac{1}{2} * a * (b - 2r - t_w) * (h - 2 * t_f)^2 + \frac{1}{6} * a * d^3 + a * t_f * (h - t_f)^2 \\
&= \frac{1}{2} * 0,5cm * 14cm * (14cm)^2 + \frac{1}{2} * 0,5cm * (14cm - 2 * 1,2cm - 0,7cm) \\
&\quad * (14cm - 2 * 1,2cm)^2 + \frac{1}{6} * 0,5cm * (9,2cm)^3 + 0,5cm * 1,2cm * (14cm - 1,2cm)^2 \\
I_y &= 1216cm^4
\end{aligned}$$

Beanspruchung des Linienquerschnitts:

$$\sigma_w = \frac{M_y}{I_y} * z = \frac{1341kNcm}{1216cm^4} * 7cm = 9,65kN/cm^2$$

$$\tau_{w,z} = \tau_{||} = \frac{V_z}{A_z} = \frac{83,82kN}{9,2cm^2} = 9,11kN/cm^2$$

$$\sigma_{w,Ed} = \sqrt{\sigma_w^2 + \tau_{w,z}^2} = \sqrt{(9,65kN/cm^2)^2 + (9,11kN/cm^2)^2} = 13,27kN/cm^2$$

$$\text{Nachweis: } \frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} = \frac{13,27kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,64 < 1,0$$

4.8 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

-Teilsicherheitsbeiwert: $\gamma_{Q,ser} = 1,0$

4.8.1 vertikale Durchbiegung

Tabellen: siehe Anhang 4

a) Vertikale Durchbiegung δ_z eines Kranbahnträgers

-Einwirkungskombination GZG:

$$EK_{GZG,v} = 1,0 * \text{Eigengewicht KBT} + \gamma_{Q,ser} * (\text{Eigengewicht Kranbrücke} + \text{Hublast})$$

-Radlast: $R_{1,1,2} = R_{2,1,2} = 124,48kN$

$$R_{1,1,1} = R_{2,1,1} = 135,41kN$$

$$\rightarrow \max \delta_z = 5,4mm$$

-Nachweis: $\text{vorh } \delta_z = 5,4mm = \frac{l}{1111} < \frac{l}{600}$

b) Differenz Δh_c der vertikalen Durchbiegung zweier benachbarter Träger

$$\Delta h_c \leq \frac{s}{600}$$

$$0,54cm \leq \frac{2200cm}{600}$$

$$0,54cm \leq 3,67cm$$

4.8.2 horizontale Durchbiegung

a) Horizontale Durchbiegung δ_y eines Kranbahnträgers

-Einwirkungskombination GZG:

$$EK_{GZG,h} = \gamma_{Q,ser} * \text{Spurführungskräfte}$$

-Spurführungskraft: $H = 33,43kN$

$$\rightarrow \max \delta_y = 5,2mm$$

-Nachweis: $\text{vorh } \delta_y = 5,2mm = \frac{l}{1154} < \frac{l}{600}$

b) Horizontale Verschiebung δ_y einer Stütze in Höhe der Kranauflagerung

vgl. Tabelle 16: Grenzwerte für Verformung, EC3-6 NA, Tab. NA.2, siehe [8], Kap. 7.3(1)

Hubklasse	grenz δ_y
HC 1	$h_c / 250$
HC 2	$h_c / 300$
HC 3	$h_c / 350$
HC 4	$h_c / 400$

HC3: $\text{grenz } \delta_y = \frac{h_c}{350} = \frac{850cm}{350} = 2,43cm \rightarrow \text{maximal zulässige Stützenverschiebung}$

4.8.3 Stegblechatmen

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{34,4cm}{1,4cm} = 24,6 < 120$$

Das b/t -Verhältnis des Stegs ist eingehalten. Der Nachweis des Stegblechatmens kann somit entfallen.

4.8.4 Untergurtschwingen

$$\frac{L}{i_z} = \frac{600cm}{9,76cm} = 61,5 < 250$$

4.9 Ermüdungsnachweis

4.9.1 Allgemeine Festlegungen

vgl. Tabelle 7: Empfehlungen für γ_{Mf} - Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit, EC3-1-9, Tab. 3.1, siehe [7], Kap. 3

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsver-sagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

- $\gamma_{Ff} = 1,0$ für die Einwirkung (25 Jahre Nutzung)
- $\gamma_{Mf} = 1,15$ für den Widerstand (Zuverlässigkeitskonzept: Schadenstoleranz; hohe Schadensfolge)
- $\Delta\sigma_c$ ist die ertragbare Spannungsschwingbreite bei $N_E = 2 * 10^6$ Lastwechseln
- Schadensäquivalenter Beiwert λ

vgl. Tabelle18: λ_i - Werte entsprechend der Kranklassifizierung, EC1-3, Tab. 2.12, siehe [3], Kap. 2.12.1

Klassen S	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Normal-spannung	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,00	1,260	1,587
Schub-spannung	0,379	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,00	1,149	1,320

für Längsspannung: $\lambda = 0,794$

für Schubspannung: $\lambda = 0,871$

-Begrenzung der Spannungsschwingbreiten:

Längsspannung: $\Delta\sigma \leq 1,5 * f_y$

Schubspannung: $\Delta\tau \leq 1,5 * f_y / \sqrt{3}$

- Beanspruchungsklasse S₆ -> Berücksichtigung der Stegblechbiegung

4.9.2 Schwingbeiwerte und Radlasten

$$\text{Kran1} \quad \varphi_{fat,1,1} = \frac{1+\varphi_1}{2} = \frac{1+1,1}{2} = 1,05$$

$$\varphi_{fat,2,1} = \frac{1+\varphi_2}{2} = \frac{1+1,18}{2} = 1,09$$

$$\text{Kran2} \quad \varphi_{fat,1,2} = \frac{1+\varphi_1}{2} = \frac{1+1,1}{2} = 1,05$$

$$\varphi_{fat,2,2} = \frac{1+\varphi_2}{2} = \frac{1+1,06}{2} = 1,03$$

$$EK_E = \gamma_{Ff} * (\varphi_{fat,1} * EG \text{ Kranbrücke} + \varphi_{fat,2} * \text{Hublast})$$

$$R_{1,1,1} = 1,0 * (1,05 * 32,34kN + 1,09 * 103,03kN) = 146,3kN$$

$$R_{1,1,2} = 1,0 * (1,05 * 32,34kN + 1,09 * 92,1kN) = 134,3kN$$

$$R_{2,1,1} = 1,0 * (1,05 * 32,34kN + 1,03 * 103,03kN) = 140,1kN$$

$$R_{2,1,2} = 1,0 * (1,05 * 32,34kN + 1,03 * 92,1kN) = 128,8kN$$

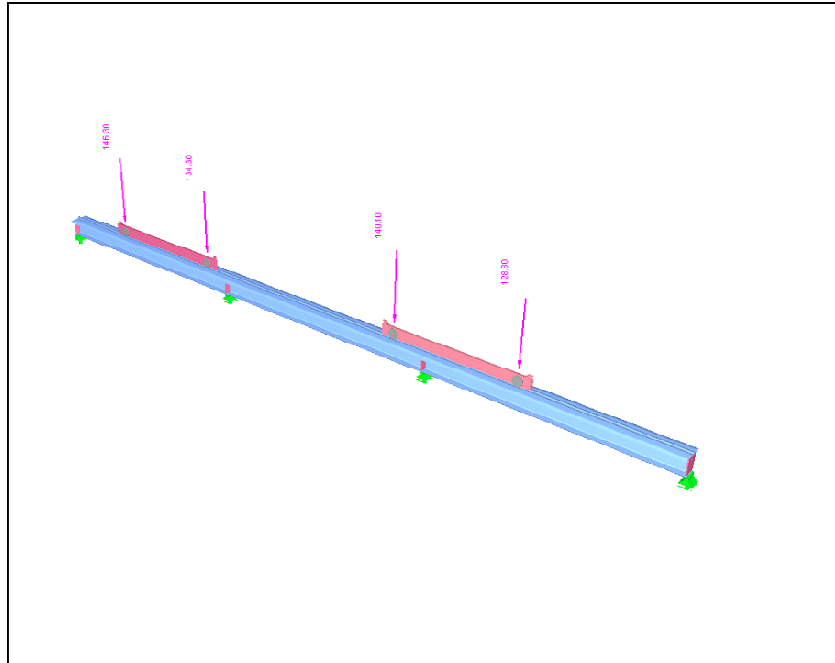


Abbildung 21: charakteristische Radlasten für den Ermüdungsnachweis, Abbildung aus [12]

4.9.3 Nachweis der Ermüdung

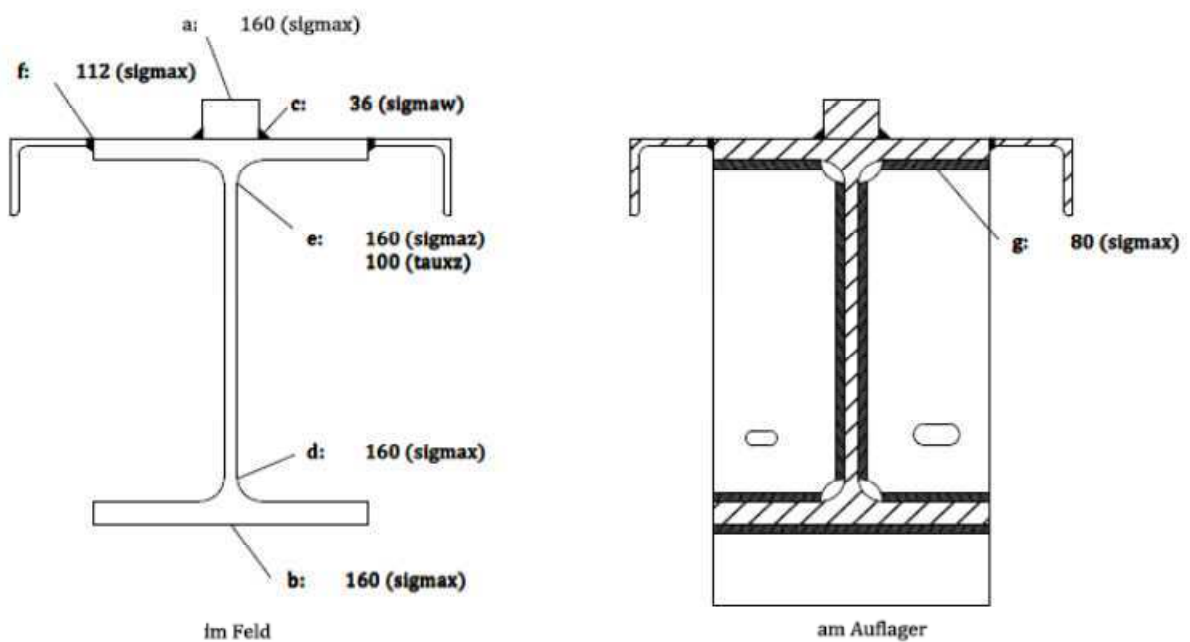


Abbildung 22: Nachweisstellen und Kerbfälle, eigene Zeichnung mit [14]

4.9.3.1 Nachweis der Schienenoberkante

-Nachweisstelle a, Abb. 22, σ_x

-Spannungen: $\sigma_{x,max} = \frac{maxM_y}{I_y} * z = \frac{37650kNcm}{103056cm^4} * (-23,84cm) = -8,71kN/cm^2$

$$\sigma_{x,min} = 0$$

$$\Delta\sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |-8,71kN/cm^2 - 0| = 8,71kN/cm^2$$

-Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda * \Delta\sigma_x = 0,794 * 8,71kN/cm^2 = 6,92kN/cm^2$$

Kerbklasse 160 für σ_x : Bezugswert $\Delta\sigma_c = 16kN/cm^2$

-Nachweis an der Stelle $x = 3,0m$

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} = \frac{1,0 * 6,92kN/cm^2}{\frac{16kN/cm^2}{1,15}} = 0,5 < 1,0$$

4.9.3.2 Normalspannungen an der Flanschunterkante

-Nachweisstelle b, Abb. 22, σ_x

-Spannungen: $\sigma_{x,max} = \frac{maxM_y}{I_y} * z = \frac{37650kNcm}{103056cm^4} * (27,16cm) = 9,92kN/cm^2$

$$\sigma_{x,min} = 0$$

$$\Delta\sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |9,92kN/cm^2 - 0| = 9,92kN/cm^2$$

-Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda * \Delta\sigma_x = 0,794 * 9,92kN/cm^2 = 7,88kN/cm^2$$

Kerbklasse 112 für σ_x : Bezugswert $\Delta\sigma_c = 11,2kN/cm^2$

-Nachweis an der Stelle $x = 3,0m$

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} = \frac{1,0 * 7,88kN/cm^2}{\frac{11,2kN/cm^2}{1,15}} = 0,81 < 1,0$$

4.9.3.3 Lasteinleitungsspannung Schienenschweißnaht

-Nachweisstelle c, Abb. 22, σ_w

-Kehlnahtdicke der Schienenschweißnaht $a = 10mm$

-Auf 87,5% abgenutzte Schiene: $h = 0,875 * 6cm = 5,25cm$

-Lastausbreitung an der Flanschoberkante: $c = 15,4cm$

-Spannungen an der Schweißnahtunterkante infolge Radlast $F = R_{1,11} = 146,3kN$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{c * 2 * a} = \frac{146,3kN}{15,4cm * 2 * 1,0cm} = 4,75kN/cm^2$$

$$\tau_{\perp} = 0$$

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2} = \sqrt{((4,75kN/cm^2)^2 + 0^2)} = 4,75kN/cm^2$$

-Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda * \Delta\sigma_x = 0,794 * 4,75kN/cm^2 = 3,77kN/cm^2$$

Kerbklasse 125 für σ_w : Bezugswert $\Delta\sigma_c = 12,5kN/cm^2$

-Nachweis

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} = \frac{1,0 * 3,77kN/cm^2}{\frac{12,5kN/cm^2}{1,15}} = 0,35 < 1,0$$

4.9.3.4 Stegansatz im Feld

a₁) σ_x aus globaler Tragwirkung infolge maximalen Moment

-Nachweisstelle d, Abb. 22, σ_x

-Schnittgrößen bei $x = 3,0m$

$$-maxM_y = 376,5kNm$$

$$-minM_y = 0$$

$$-\Delta M = 376,5kNm$$

-Spannungen $\sigma_x = \frac{\Delta M}{I_y} * z = \frac{37650kNcm}{103056cm^4} * (21,86cm) = 7,99kN/cm^2$

$$\sigma_{x,min} = 0$$

$$\Delta\sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |-7,99kN/cm^2 - 0| = 7,99kN/cm^2$$

-Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

$$\Delta\sigma_{x,E,2} = \lambda * \Delta\sigma_x = 0,794 * 7,99kN/cm^2 = 6,34kN/cm^2$$

-Kerbklasse 160 für σ_x : Bezugswert $\Delta\sigma_{x,c} = 16,0kN/cm^2$

-Nachweis

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{x,E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} = \frac{1,0 * 6,34kN/cm^2}{\frac{16,0kN/cm^2}{1,15}} = 0,46 < 1,0$$

a₂) Radlastpressung σ_z am Übergang Walzradius-Steg

-Nachweisstelle d, Abb. 22, σ_z

-Lastausbreitung $l_{eff} = 18,4cm$

-Radlast $F = R_{1,1,1} = 146,3kN$

-Spannungen

$$\sigma_{oz,Ed,max} = -\frac{F}{l_{eff} \cdot t_w} = -\frac{146,3kN}{18,4cm \cdot 1,4cm} = -5,68kN/cm^2$$

$$\sigma_{oz,Ed,min} = 0$$

$$\Delta\sigma_{oz,Ed} = |\sigma_{oz,Ed,max} - \sigma_{oz,Ed,min}| = |-5,68kN/cm^2 - 0| = 5,68kN/cm^2$$

-Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

$$\Delta\sigma_{z,E,2} = \lambda * \Delta\sigma_{oz,Ed} = 0,794 * 5,68kN/cm^2 = 4,51kN/cm^2$$

-Kerbkategorie 160 für σ_z : Bezugswert $\Delta\sigma_{z,c} = 16,0kN/cm^2$

-Nachweis

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{z,E,2}}{\frac{\Delta\sigma_{z,c}}{\gamma_{Mf}}} = \frac{1,0 * 4,51kN/cm^2}{\frac{16,0kN/cm^2}{1,15}} = 0,32 < 1,0$$

a₃) Schubspannung τ_{xz} aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung

-Nachweisstelle d, Abb. 22, τ_{xz}

-Querkraft an der Stelle $x = 6,0m$

$$-maxV = 312,7kN$$

$$-minV = 0$$

$$-\Delta V = 312,7kN$$

-Schubspannungen aus globaler Tragwirkung

$$\Delta\tau_{xz,Ed} = \frac{\Delta V * S_{y,r}}{I_y * t_w} = \frac{312,7kN * 2504,11cm^3}{103056cm^4 * 1,4cm} = 5,43kN/cm^2$$

-lokale Schubspannungen ($\cong 20\%$ der Radlastpressung)

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,2 * \sigma_{oz,Ed} = 0,2 * 5,68kN/cm^2 = 1,14kN/cm^2$$

-Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

$$\Delta\tau_{xz} = \Delta\tau_{xz,Ed} + 2 * \tau_{oxz,Ed} = 5,43kN/cm^2 + 2 * 1,14kN/cm^2 = 7,71kN/cm^2$$

$$\Delta\tau_{E,2} = \lambda * \Delta\tau_{xz} = 0,871 * 7,71kN/cm^2 = 6,72kN/cm^2$$

-Kerbkategorie 100 für τ_{xz} : Bezugswert $\Delta\tau_c = 10,0\text{kN/cm}^2$

-Nachweis

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2}}{\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}} = \frac{1,0 * 6,72\text{kN/cm}^2}{\frac{10,0\text{kN/cm}^2}{1,15}} = 0,77 < 1,0$$

a.) Interaktion

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{x,E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{z,E,2}}{\frac{\Delta\sigma_{z,c}}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2}}{\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}} \right)^5 = 0,46^3 + 0,32^3 + 0,77^5 = 0,4 \leq 1,0$$

4.9.3.5 Nahtbereich des angeschweißten Winkelprofils

-Nachweisstelle f, Abbildung 22, σ_x

-Spannung an der äußeren Obergurtecke (berechnet mit [12]):

$$\sigma_x = 10,61\text{kN/cm}^2$$

-Spannungsschwingbreite

$$\sigma_{x,max} = 10,61\text{kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,min} = 0$$

$$\Delta\sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |10,61\text{kN/cm}^2 - 0| = 10,61\text{kN/cm}^2$$

-Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

$$\Delta\sigma_{x,E,2} = \lambda * \Delta\sigma_x = 0,794 * 10,61\text{kN/cm}^2 = 8,42\text{kN/cm}^2$$

-Kerbkategorie 100 für σ_x : Bezugswert $\Delta\sigma_{x,c} = 10,0\text{kN/cm}^2$

-Nachweis

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{x,E,2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} = \frac{1,0 * 8,42\text{kN/cm}^2}{\frac{10,0\text{kN/cm}^2}{1,15}} = 0,97 < 1,0$$

5 Nachweis und Bemessung der Stütze

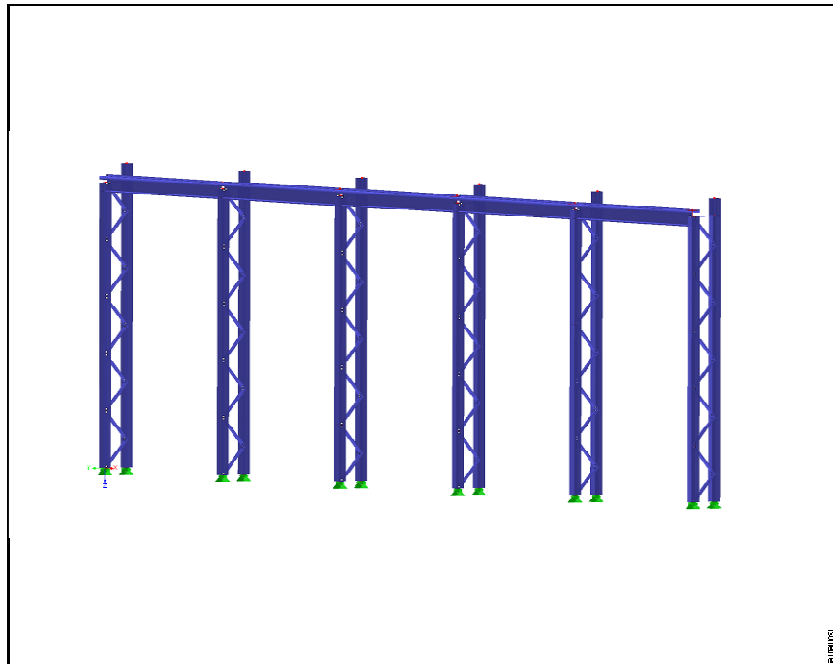


Abbildung 23: grafische Darstellung einer Kranbahnnachse, Abbildung aus [12]

5.1 Schwingbeiwerte

Allgemein: -Unterstützungs- u. Aufhängungskonstruktionen bei $\varphi > 1,1$ um $\Delta\varphi = 0,1$ reduzieren

-Bemessung der Gründung ohne φ

-Schwingbeiwerte für die Unterstützungs konstruktion:

Kran1:

$$\varphi_1 = 1,1$$

$$\varphi_2 = 1,18 - 0,1 = 1,08$$

$$\varphi_3 = \varphi_4 = 1,0$$

$$\varphi_5 = 1,5 - 0,1 = 1,4$$

$$\varphi_6 = 1,09$$

$$\varphi_7 = 1,25 - 0,1 = 1,15$$

Kran2:

$$\varphi_1 = 1,1$$

$$\varphi_2 = 1,06$$

$$\varphi_3 = \varphi_4 = 1,0$$

$$\varphi_5 = 1,5 - 0,1 = 1,4$$

$$\varphi_6 = 1,03$$

$$\varphi_7 = 1,25 - 0,1 = 1,15$$

5.2 Lastannahmen

5.2.1 charakteristische Werte der vertikalen Radlasten

Lastfall 1: Kran1

$$F_{a,1,11} = \varphi_1 * R_g + \varphi_2 * R_{h,1,11} = 1,1 * 32,34kN + 1,08 * 103,03kN$$

$$F_{a,1,11} = 146,8kN$$

$$F_{a,1,12} = \varphi_1 * R_g + \varphi_2 * R_{h,1,12} = 1,1 * 32,38kN + 1,08 * 92,1kN$$

$$F_{a,1,12} = 135,0kN$$

Kran2

$$F_{a,2,11} = \varphi_1 * R_g + \varphi_2 * R_{h,1,11} = 1,1 * 32,34kN + 1,06 * 103,03kN$$

$$F_{a,2,11} = 144,8kN$$

$$F_{a,2,12} = \varphi_1 * R_g + \varphi_2 * R_{h,1,12} = 1,1 * 32,38kN + 1,06 * 92,1kN$$

$$F_{a,2,12} = 133,2kN$$

Lastfall 2: Kran1

$$F_{b,1,11} = \varphi_4 * R_g + \varphi_4 * R_{h,1,11} = 1,0 * 32,38kN + 1,0 * 103,03kN$$

$$F_{b,1,11} = 135,41kN$$

$$F_{b,1,12} = \varphi_4 * R_g + \varphi_4 * R_{h,1,12} = 1,0 * 32,38kN + 1,0 * 92,1kN$$

$$F_{b,1,12} = 124,48kN$$

Kran2

$$F_{b,2,11} = \varphi_4 * R_g + \varphi_4 * R_{h,1,11} = 1,0 * 32,38kN + 1,0 * 103,03kN$$

$$F_{b,2,11} = 135,41kN$$

$$F_{b,2,12} = \varphi_4 * R_g + \varphi_4 * R_{h,1,12} = 1,0 * 32,38kN + 1,0 * 92,1kN$$

$$F_{b,2,12} = 124,48kN$$

5.2.2 charakteristische Werte der horizontalen Radlasten

Lastfall 1: $H_{a,1,11} = \varphi_5 * H_{M,1,11} = 1,4 * 12,41kN = 17,4kN$

$$H_{a,1,12} = \varphi_5 * H_{M,1,12} = 1,4 * (-12,41kN) = -17,4kN$$

$$H_{a,2,11} = \varphi_5 * H_{M,2,11} = 1,4 * 12,41kN = 17,4kN$$

$$H_{a,2,12} = \varphi_5 * H_{M,2,12} = 1,4 * (-12,41kN) = -17,4kN$$

Lastfall 2: $H_{b,1,11} = 1,0 * H_{S,1,11} = 1,0 * 0 = 0$

$$H_{b,1,12} = 1,0 * H_{S,1,12} = 1,0 * (-33,43kN) = -33,43kN$$

$$H_{b,2,11} = 1,0 * H_{S,2,11} = 1,0 * 0 = 0$$

$$H_{b,2,12} = 1,0 * H_{S,2,12} = 1,0 * (-33,43kN) = -33,43kN$$

5.3 Schnittgrößen infolge Kranüberfahrt

5.3.1 Imperfektionen für die Stütze

vgl. DIN EN 1993-1-1 S.35, [4]

-globale Anfangsschielstellung

$$\phi = \phi_0 * \alpha_h * \alpha_m$$

dabei ist: ϕ_0 der Ausgangswert: $\phi_0 = 1/200$

α_h der Abminderungsfaktor für die Höhe h der Stützen

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{jedoch } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

h Höhe des Tragwerks in m

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{8}} = 0,71$$

α_m der Abminderungsfaktor für die Anzahl der Stützen in einer Reihe

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

m Anzahl der Stützen in einer Reihe, unter ausschließlicher Betrachtung der Stützen, die eine Vertikalbelastung größer 50% der durchschnittlichen Stützenlast in der betrachteten vertikalen Richtung übernehmen

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{3}\right)} = 0,82$$

$$\phi = \phi_0 * \alpha_h * \alpha_m = \frac{1}{200} * 0,71 * 0,82 = \frac{1}{344}$$

$$\phi = \frac{800cm}{344} = 2,33cm$$

5.3.2 Laststellungen für die maximalen Schnittgrößenermittlung

Einwirkungskombination GZT:

$$1,35 * (\text{Eigengewicht KBT} + \text{Eigengewicht Stütze}) + 1,5 * \text{Radlast}$$

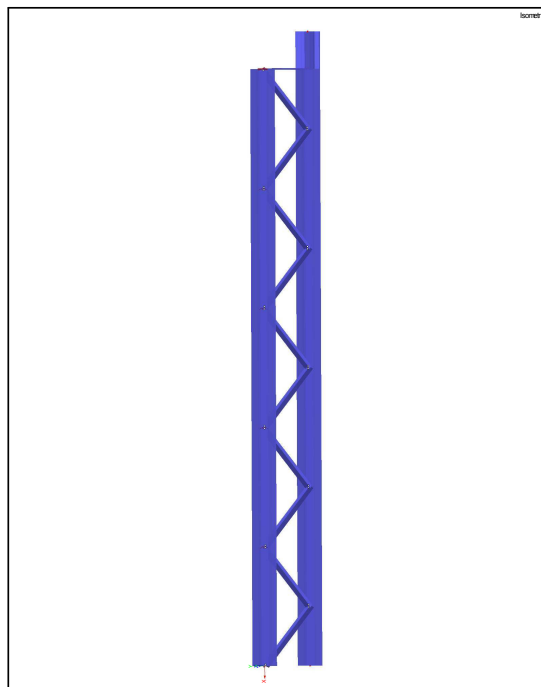


Abbildung 24: grafische Darstellung einer Stütze, Abbildung aus [12]

Laststellung 1:

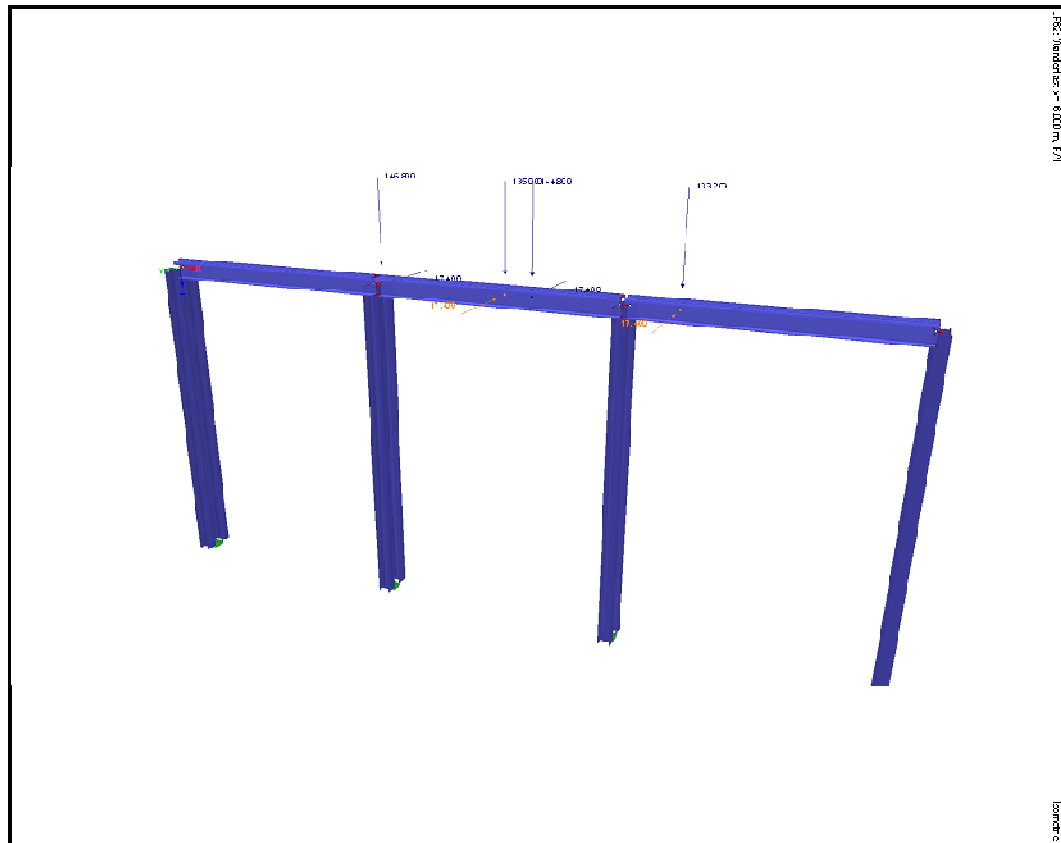


Abbildung 25: maßgebende Laststellung 1, Abbildung aus [12]

Schnittkräfte:

Laststellung 1	Stütze (Kopf 1)	Stütze (Fuß 1)	Stütze (Kopf 2)	Stütze (Fuß 2)	Diagonale
N_{Ed}	$-355,89kN$	$-196,86kN$	$-0,71kN$	$-271,21kN$	$-60,44kN/34,33kN$
$M_{y,Ed}$	$22,98kNm$	$-3,05kNm$	0	0	
$M_{z,Ed}$	0	0	$-10,43kNm$	0	

Laststellung 2:

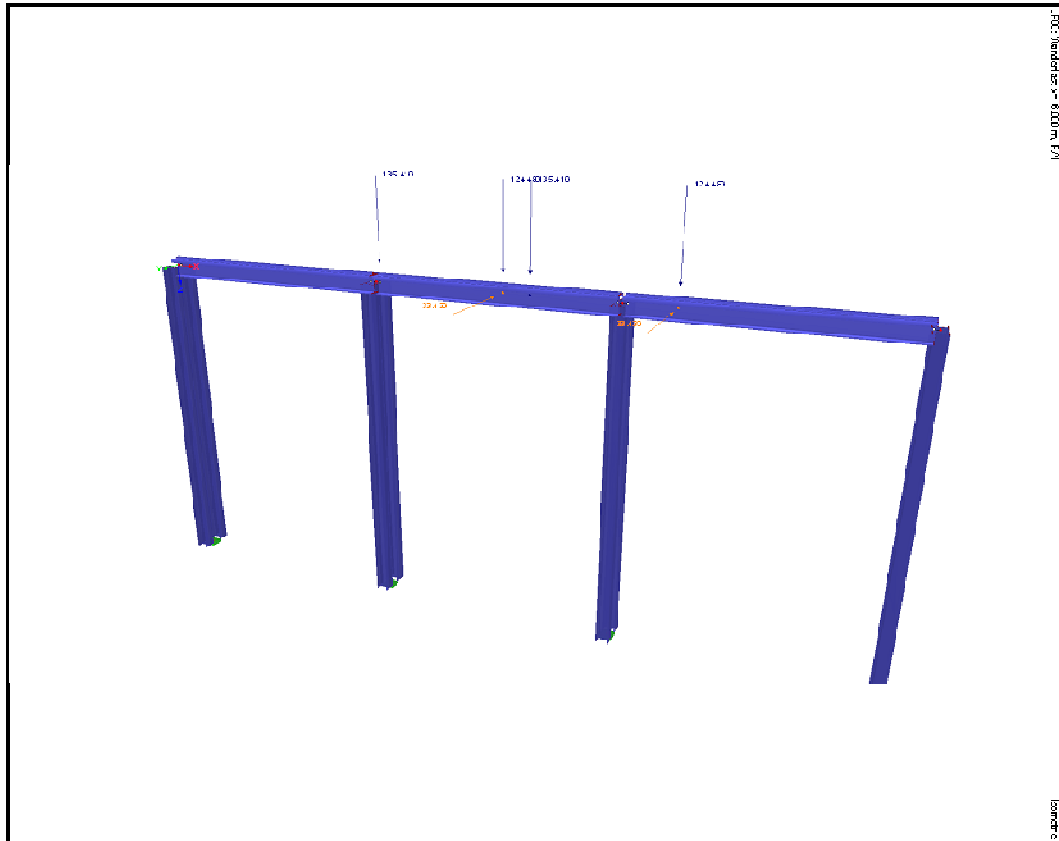


Abbildung 26: maßgebende Laststellung 2, Abbildung aus [12]

Schnittkräfte:

Laststellung 2	Stütze (Kopf 1)	Stütze (Fuß 1)	Stütze (Kopf 2)	Stütze (Fuß 2)	Diagonale
N_{Ed}	$-321,7kN$	$-173,94kN$	$-0,82kN$	$-304,43kN$	$-67,26kN/38,22kN$
$M_{y,Ed}$	$21,25kNm$	$-2,22kNm$	0	$-3,72kNm$	
$M_{z,Ed}$	0	0	$11,63kNm$	0	

Laststellung 3:

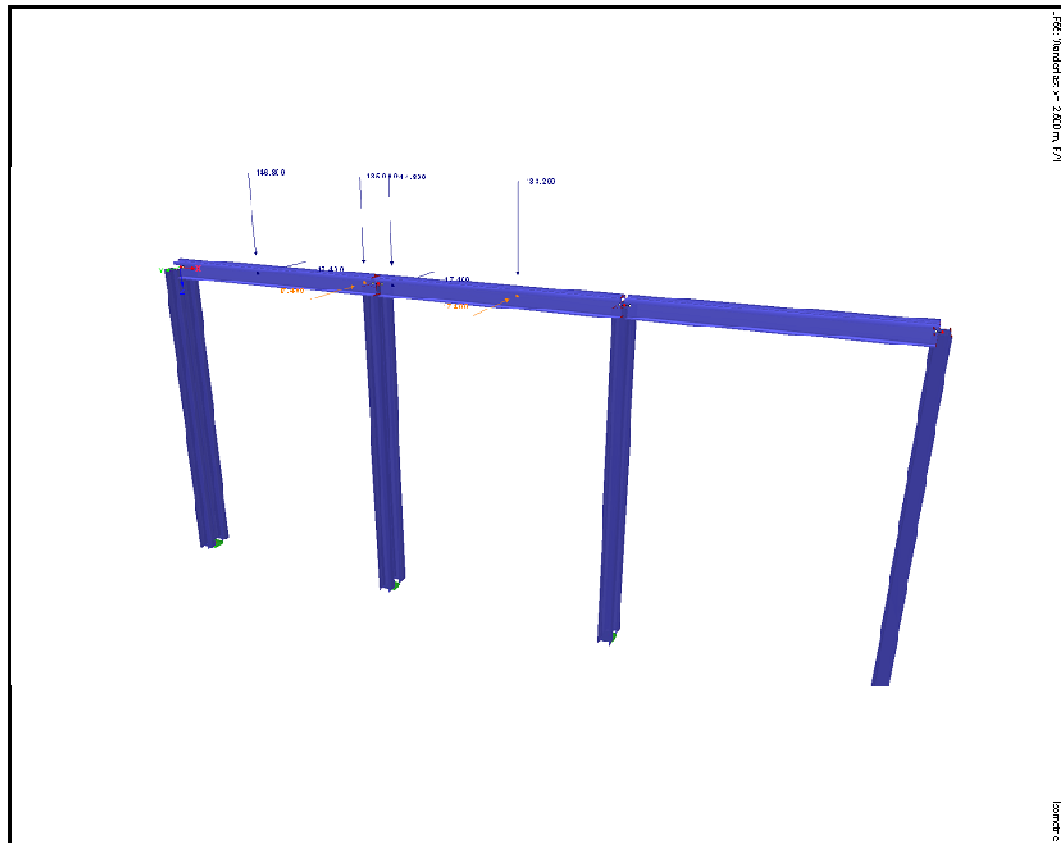


Abbildung 27: maßgebende Laststellung 3, Abbildung aus [12]

Schnittkräfte:

Laststellung 3	Stütze (Kopf 1)	Stütze (Fuß 1)	Stütze (Kopf 2)	Stütze (Fuß 2)	Diagonale
N_{Ed}	$-580,33kN$	$-620,97kN$	$-0,14kN$	$-3,09kN$	$-10,68kN/2,88kN$
$M_{y,Ed}$	0	$-3,86kNm$	0	$-3,61kNm$	
$M_{z,Ed}$	0	0	0	0	

Laststellung 4:

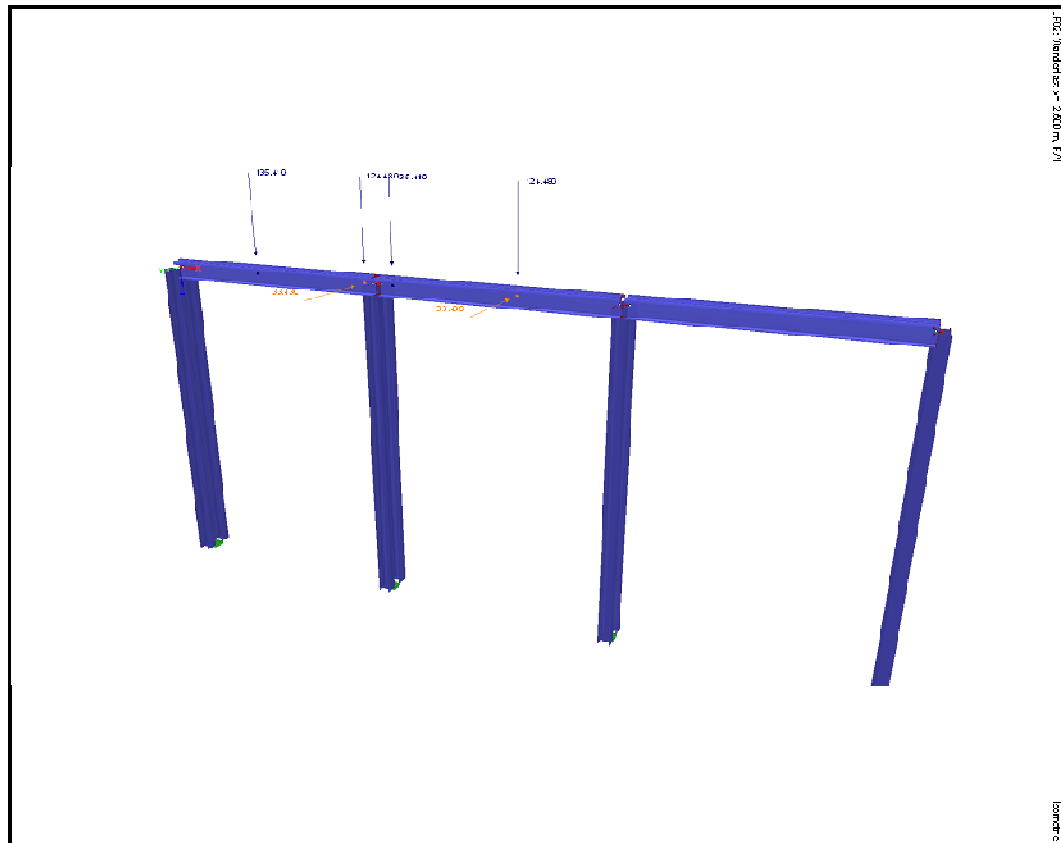


Abbildung 28: maßgebende Laststellung 4, Abbildung aus [12]

Schnittkräfte:

Laststellung 4	Stütze (Kopf 1)	Stütze (Fuß 1)	Stütze (Kopf 2)	Stütze (Fuß 2)	Diagonale
N_{Ed}	$-407,24kN$	$181,53kN$	$-2,18kNm$	$-862,7kN$	$-182,47kN/119,18kN$
$M_{y,Ed}$	0	$-4,61kNm$	0	$-1,26kNm$	
$M_{z,Ed}$	0	0	$33,99kNm$	0	

5.4 Nachweis der Tragfähigkeit

5.4.1 Klassifizierung des Stützenquerschnitts

-Einordnung des Gurtstabes *HEA 220 S235* ($\varepsilon = 1,0$), siehe Anhang 1

Steg auf Druck beansprucht

$$\frac{c}{t} = \frac{15,2cm}{0,7cm} = 21,7 < 33\varepsilon$$

-> Querschnittsklasse 1

Flansch auf Druck beansprucht

$$\frac{c}{t} = \frac{8,85cm}{1,1cm} = 7,75 < 9\varepsilon$$

-> Querschnittsklasse 1

=> Der auf Druck beanspruchte Querschnitt ist der Querschnittsklasse 1 zuzuordnen.

-Einordnung des Gitterstabes *L 90x9 S235* ($\varepsilon = 1,0$), siehe Anhang 1

Winkel auf Druck beansprucht

$$\frac{h}{t} = \frac{9cm}{0,9cm} = 10 \leq 15\varepsilon$$

$$\frac{b+h}{2*t} = \frac{18cm}{1,8cm} = 10 \leq 11,5\varepsilon$$

=> Querschnittsklasse 3

5.4.2 Querschnittsnachweis der Stütze

5.4.2.1 Nachweis des Gurtstabs auf Zugbeanspruchung

$N_{Ed} = 394,63kN$ (maximale Zugkraft)

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{64,3cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1,0} = 1511,1kN$$

Nachweis:

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{394,63kN}{1511,1kN} = 0,26 \leq 1,0$$

5.4.2.2 Nachweis des Gurtstabs auf Druckbeanspruchung

$N_{Ed} = 862,7kN$ (maximale Druckkraft)

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{64,3cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1,0} = 1511,1kN$$

Nachweis:

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{862,7kN}{1511,1kN} = 0,57 \leq 1,0$$

5.4.2.3 Nachweis des Gitterstabs auf Zugbeanspruchung

$N_{Ed} = 119,18kN$ (maximale Zugkraft)

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{15,5cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1,0} = 364,3kN$$

Nachweis:

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{119,18kN}{364,3kN} = 0,33 \leq 1,0$$

5.4.2.4 Nachweis des Gitterstabs auf Druckbeanspruchung

$N_{Ed} = 182,47kN$ (maximale Druckkraft)

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{15,5cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1,0} = 364,3kN$$

Nachweis:

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{182,47kN}{364,3kN} = 0,50 \leq 1,0$$

5.4.3 Stabilitätsnachweis der Gitterstütze

5.4.3.1 Knicknachweis der Gurtstäbe unter der einwirkenden, maximalen Normalkraft

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Bemessungswert der Gurtstabkraft $N_{ch,Ed}$ bei zwei gleichen Gurtstäben

$$N_{ch,Ed} = 0,5 * N_{Ed} + \frac{M_{Ed} * h_0 * A_{ch}}{2 * I_{eff}}$$

dabei ist

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} * e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$$

$$N_{Ed} = \frac{\pi^2 * E * I_{eff}}{L^2} \text{ die effektive ideale Verzweigungslast für das mehrteilige Bauteil}$$

N_{Ed} der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft auf das mehrteilige Bauteil

M_{Ed} der Bemessungswert des einwirkenden maximalen Momentes in der Mitte des mehrteiligen Bauteils unter Berücksichtigung der Effekte aus der Theorie II. Ordnung

M_{Ed}^I der Bemessungswert des einwirkenden maximalen Momentes in der Mitte des mehrteiligen Bauteils nach Theorie I. Ordnung (ohne Effekte aus der Theorie II. Ordnung)

e_0 Stichmaß der Anfangsvorkrümmung der Stütze ($e_0 = L/500$)

h_0 der Abstand zwischen den Schwereachsen der Gurtstäbe

A_{ch} die Querschnittsfläche eines Gurtstabes

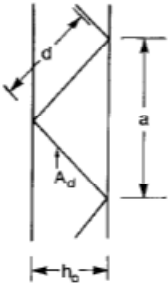
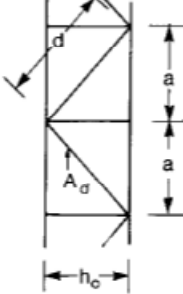
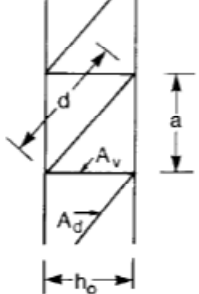
System			
S_V	$\frac{n E A_d a h_0^2}{2 d^3}$	$\frac{n E A_d a h_0^2}{d^3}$	$\frac{n E A_d a h_0^2}{d^3 \left[1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]}$
<p>n ist die Anzahl der parallelen Ebenen der Gitterstäbe</p> <p>A_d und A_v sind die Querschnittsflächen der Gitterstäbe einer Gitterebene</p>			

Abbildung 29: Schubsteifigkeit von Gitterstützen infolge der Verformung der Gitterstütze, EC3-1-1, Bild 6.9, siehe [4], Kap. 6.4.2.1

$I_{eff} = 0,5 * h_0^2 * A_{ch}$ das effektive Flächenträgheitsmoment der Gitterstütze

$S_v = \frac{n * E * A_d * a * h_0^2}{2 * d^3}$ die Schubsteifigkeit infolge der Verformung der Gitterstäbe

n ist die Anzahl der parallelen Ebenen der Gitterstäbe

A_d ist die Querschnittsfläche der Gitterstäbe einer Gitterebene

-Querschnitt der Stütze

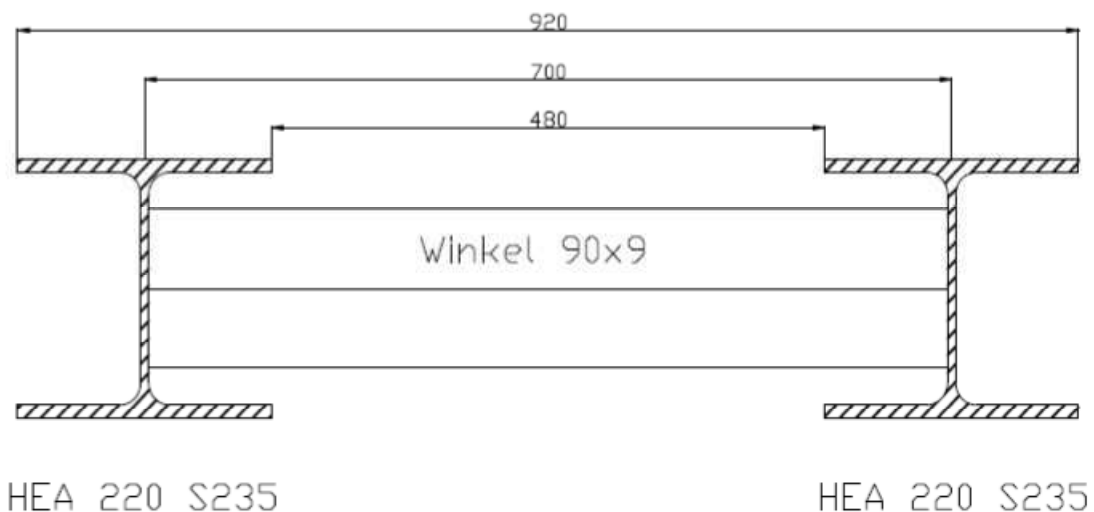


Abbildung 30: Querschnitt der Fachwerkstütze, eigene Zeichnung mit [14]

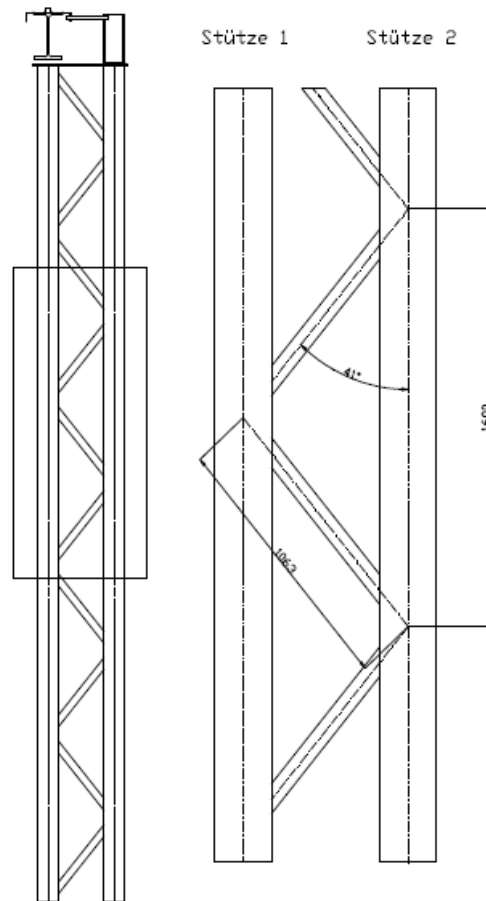


Abbildung 31: Ansicht der Fachwerkstütze, eigene Zeichnung mit [14]

$$n = 5$$

$$A_d = 15,5 \text{ cm}^2$$

$$a = 1600 \text{ mm}$$

$$h_0 = 700 \text{ mm}$$

$$d = 1063 \text{ mm}$$

$$S_v = \frac{n * E * A_d * a * h_0^2}{2 * d^3} = \frac{5 * 21000 \text{ kN/cm}^2 * 15,5 \text{ cm}^2 * 160 \text{ cm} * (70 \text{ cm})^2}{2 * (106,3 \text{ cm})^3} = 531138 \text{ kN}$$

$$A_{ch} = 64,3 \text{ cm}^2$$

$$I_{eff} = 0,5 * h_0^2 * A_{ch} = 0,5 * (70 \text{ cm})^2 * 64,3 \text{ cm}^2 = 157535 \text{ cm}^4$$

$$e_0 = \frac{L}{500} = \frac{800 \text{ cm}}{500} = 1,6 \text{ cm}$$

-maximal einwirkende Drucknormalkraft: $N_{Ed} = 587,72 \text{ kN}$

$$M_{Ed}^I = 5,69 \text{ kNm}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_{eff}}{L^2} = \frac{\pi^2 * 21000 \text{ kN/cm}^2 * 157535 \text{ cm}^4}{(800 \text{ cm})^2} = 51017 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} * e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}} = \frac{587,72kN * 1,6cm + 569kNcm}{1 - \frac{587,72kN}{51017kN} - \frac{587,72kN}{531138kN}} = 1544kNcm$$

$$N_{ch,Ed} = 0,5 * N_{Ed} + \frac{M_{Ed} * h_0 * A_{ch}}{2 * I_{eff}} = 0,5 * 587,72kN + \frac{1544kNcm * 70cm * 64,3cm^2}{2 * 157535cm^4} = 316kN$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\text{mit: } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$$

χ für Knicklänge $L_{cr,y} = L_{ch,y} = 8,0m$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{ch,y}^2} = \frac{\pi^2 * 21000kN/cm^2 * 5410cm^4}{(800cm)^2} = 1752kN$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{64,3cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1752kN}} = 0,93$$

$$\text{mit: } \phi_y = 0,5 * [1 + \alpha_y * (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2]$$

$\alpha_y = 0,34$ für Knicklinie b (siehe Anhang 2)

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,93 - 0,2) + 0,93^2] = 1,06$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,06 + \sqrt{1,06^2 - 0,93^2}} = 0,64$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,64 * 64,3cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1,0} = 963,3kN$$

-Nachweis:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,Rd,y}} = \frac{316kN}{963,3kN} = 0,33 \leq 1,0$$

5.4.3.2 Knicknachweis des Gurtstabes unter der maximalen Schnittkraft

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

a₁) $N_{Ed} = 862,7 \text{ N}$ (Bezugslänge $L = 0,8 \text{ m}$)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

mit: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$

χ für Knicklänge $L_{cr,z} = L_{ch,z} = a/2 = 0,8 \text{ m}$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L_{ch,z}^2} = \frac{\pi^2 * 21000 \text{ kN/cm}^2 * 1950 \text{ cm}^4}{(80 \text{ cm})^2} = 63150 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{64,3 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2}{63150 \text{ kN}}} = 0,15$$

mit: $\phi_z = 0,5 * [1 + \alpha_z * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2]$

$\alpha_z = 0,49$ für Knicklinie c (siehe Anhang 2)

$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,15 - 0,2) + 0,15^2] = 0,5$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,5 + \sqrt{0,5^2 - 0,15^2}} = 1,02 \not\leq 1,0$$

$\chi_z = 1,0$

$$N_{b,Rd,z1} = \frac{\chi_z * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 * 64,3 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 1511,1 \text{ kN}$$

-Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,z1}} = \frac{862,7 \text{ kN}}{1511,1 \text{ kN}} = 0,57 \leq 1,0$$

a₂) $N_{Ed} = 689,42 \text{ kN}$ (Bezugslänge $L = 1,6 \text{ m}$)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

mit: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$

χ für Knicklänge $L_{cr,z} = L_{ch,z} = a = 1,6 \text{ m}$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L_{ch,z}^2} = \frac{\pi^2 * 21000 \text{ kN/cm}^2 * 1950 \text{ cm}^4}{(160 \text{ cm})^2} = 15788 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{64,3 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2}{15788 \text{ kN}}} = 0,31$$

$$\text{mit: } \phi_z = 0,5 * [1 + \alpha_z * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2]$$

$$\alpha_z = 0,49 \text{ für Knicklinie c (siehe Anhang 2)}$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,31 - 0,2) + 0,31^2] = 0,58$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,58 + \sqrt{0,58^2 - 0,31^2}} = 0,93$$

$$N_{b,Rd,z2} = \frac{\chi_z * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,93 * 64,3 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 1405 \text{ kN}$$

-Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,z2}} = \frac{689,42 \text{ kN}}{1405 \text{ kN}} = 0,49 \leq 1,0$$

5.4.3.3 Knicknachweis der Gitterstäbe unter der maximalen Schnittkraft

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$N_{Ed} = 182,47 \text{ kN (Bezugslänge } L = 1,06 \text{ m)}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\text{mit: } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2} = \frac{\pi^2 * 21000 \text{ kN/cm}^2 * 116 \text{ cm}^4}{(106 \text{ cm})^2} = 2139 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{15,5 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2}{2139 \text{ kN}}} = 0,41$$

$$\text{mit: } \phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\alpha = 0,49 \text{ für Knicklinie c (siehe Anhang 2)}$$

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,41 - 0,2) + 0,41^2] = 0,64$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,64 + \sqrt{0,64^2 - 0,41^2}} = 0,88 \leq 1,0$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,88 * 15,5 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 322 \text{ kN}$$

-Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{182,47kN}{322kN} = 0,57 \leq 1,0$$

5.4.4 Einzelnachweise

5.4.4.1 Nachweis der Schweißnaht des verlängerten Stützenarms

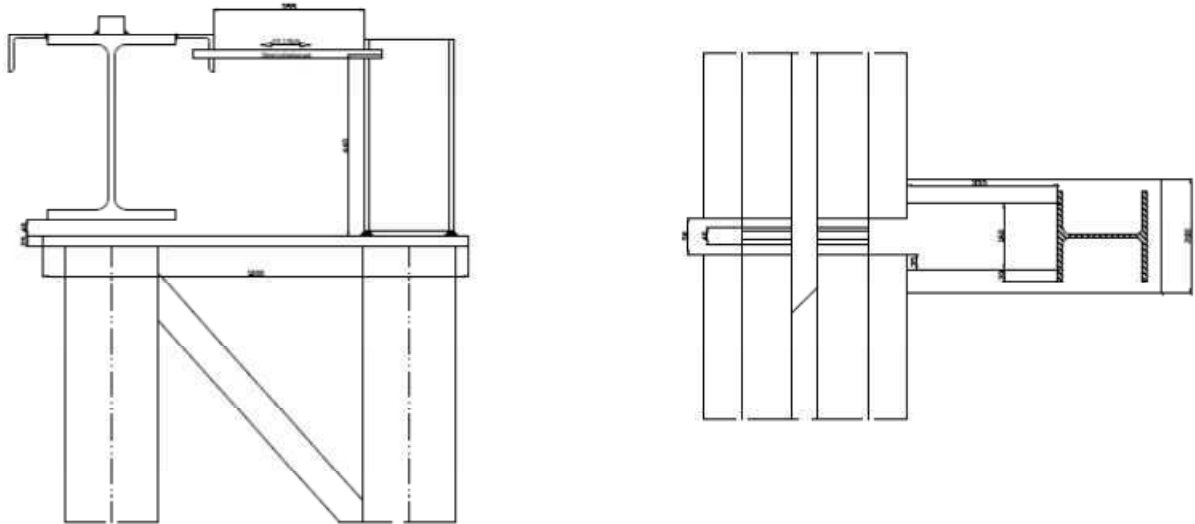


Abbildung 32: An- und Draufsicht der Stütze mit Kranbahnträger, eigene Zeichnung mit [14]

a) Nachweis der Schweißnaht

Schnittgrößen an der Schweißnaht:

$$V_{z,Ed} = \gamma_Q * H_k = 1,5 * 33,43kN = 50,15kN$$

$$M_{y,Ed} = \gamma_Q * H_k * s = 1,5 * 33,43kN * 44cm = 2206,4kNcm$$

Grenzwert Schweißnahtdicke:

$$\begin{aligned} a &= 5mm & \leq 0,7 * \min t &= 0,7 * 7mm = 4,9mm \\ & & \geq \sqrt{\max t} - 0,5 &= \sqrt{25mm} - 0,5 = 4,5mm \end{aligned}$$

Querschnittswerte des Linienquerschnitts des HEA 220:

$$a = 0,5\text{cm}, h = 21\text{cm}, b = 22\text{cm}, t_f = 1,1\text{cm}, t_w = 0,7\text{cm}, r = 1,8\text{cm}, d = 15,2\text{cm}$$

Die Nähte im Bereich der Ausrundung werden nicht mit angesetzt.

$$\begin{aligned} A_{w,Gurt} &= A_y = 2 * a * (2 * b + 2 * t_f - 2 * r - t_w) \\ &= 2 * 0,5\text{cm} * (2 * 22\text{cm} + 2 * 1,1\text{cm} - 2 * 1,8\text{cm} - 0,7\text{cm}) = 41,9\text{cm}^2 \\ A_{w,Steg} &= A_z = 2 * a * d = 2 * 0,5\text{cm} * 15,2\text{cm} = 15,2\text{cm}^2 \\ I_y &= \frac{1}{2} * a * b * h^2 + \frac{1}{2} * a * (b - 2r - t_w) * (h - 2 * t_f)^2 + \frac{1}{6} * a * d^3 + a * t_f * (h - t_f)^2 \\ &= \frac{1}{2} * 0,5\text{cm} * 22\text{cm} * (21\text{cm})^2 + \frac{1}{2} * 0,5\text{cm} * (22\text{cm} - 2 * 1,8\text{cm} - 0,7\text{cm}) \\ &\quad * (21\text{cm} - 2 * 1,1\text{cm})^2 + \frac{1}{6} * 0,5\text{cm} * (15,2\text{cm})^3 + 0,5\text{cm} * 1,1\text{cm} * (21\text{cm} - 1,1\text{cm})^2 \\ I_y &= 4500\text{cm}^4 \end{aligned}$$

Beanspruchung des Linienquerschnitts:

$$\begin{aligned} \sigma_w &= \frac{M_y}{I_y} * z = \frac{2206,4\text{kNcm}}{4500\text{cm}^4} * 10,5\text{cm} = 5,15\text{kN/cm}^2 \\ \tau_{w,z} &= \tau_{\parallel} = \frac{V_z}{A_z} = \frac{50,15\text{kN}}{15,2\text{cm}^2} = 3,3\text{kN/cm}^2 \\ \sigma_{w,Ed} &= \sqrt{\sigma_w^2 + \tau_{w,z}^2} = \sqrt{(5,15\text{kN/cm}^2)^2 + (3,3\text{kN/cm}^2)^2} = 6,12\text{kN/cm}^2 \\ \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} &= \frac{6,12\text{kN/cm}^2}{20,8\text{kN/cm}^2} = 0,29 < 1,0 \end{aligned}$$

b) Nachweis des Profils

Die ertragbaren Spannungen, sowie die Querschnittswerte des Profils, sind größer als die der Schweißnaht. Demzufolge ist der Nachweis des Profils erbracht.

5.4.4.2 Nachweis der Schweißnaht des Gitterstabanschlusses

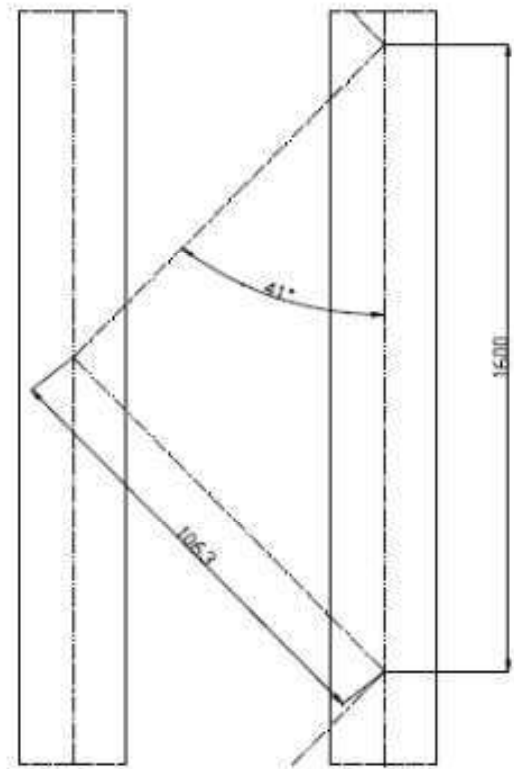


Abbildung 33: Abmessungen der Systemlinien der Stütze, eigene Zeichnung mit [14]

- maximale Drucknormalkraft: $\max N_{c,Ed} = 182,47kN$

- maximale Zugnormalkraft: $\max N_{t,Ed} = 119,18kN$

Grenzwert Schweißnahtdicke:

$$\begin{aligned} a &= 4mm & \leq 0,7 * \min t &= 0,7 * 7mm = 4,9mm \\ & & \geq \sqrt{\max t} - 0,5 &= \sqrt{9mm} - 0,5 = 2,5mm \end{aligned}$$

Schweißnahtfläche: $A_w = a * l_w = 0,4cm * (2 * 9cm/\sin 49^\circ + 2 * 7cm/\sin 49^\circ) = 17cm^2$

Drucknachweis: $\sigma_{w,Ed} = \frac{N_{c,Ed}}{A_w} = \frac{182,47kN}{17cm^2} = 10,8kN/cm^2$

$$\frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} = \frac{10,8kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,52 < 1,0$$

Zugnachweis: $\sigma_{w,Ed} = \frac{N_{t,Ed}}{A_w} = \frac{119,18kN}{17cm^2} = 7,01kN/cm^2$

$$\frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} = \frac{7,01kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,34 < 1,0$$

5.4.4.3 Nachweis des Stützenfuß

5.4.4.3.1 Übertragung der Kräfte von der Stütze in die Fußplatte

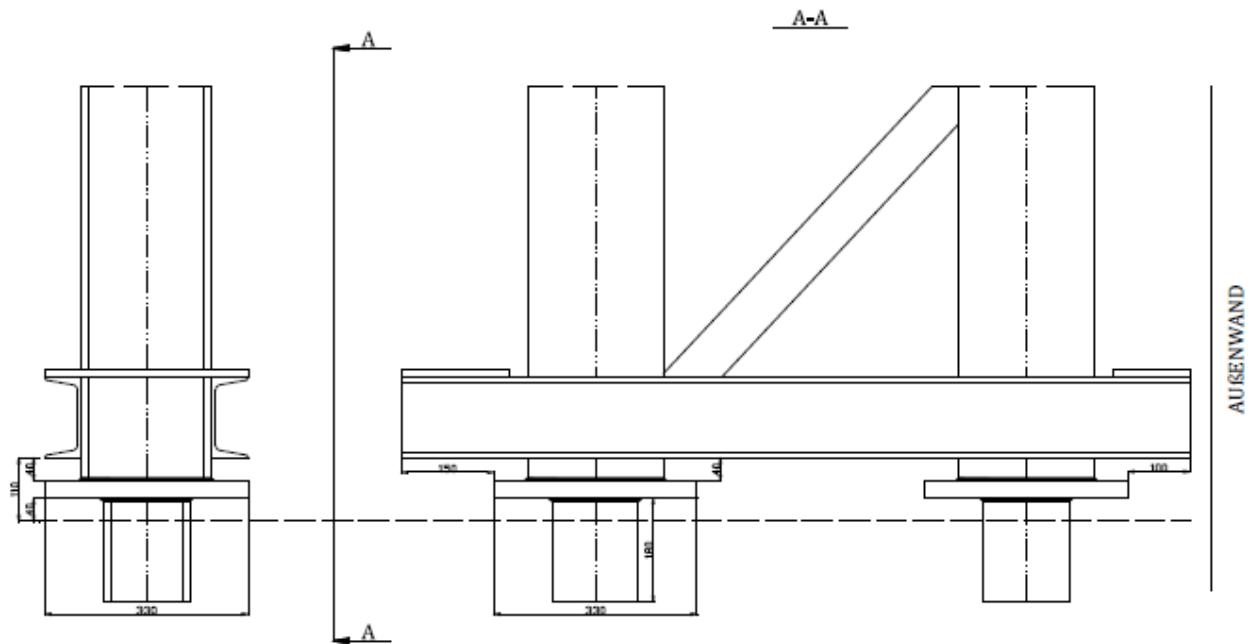


Abbildung 34: Stützenfuß, eigene Zeichnung mit [14]

a) Nachweis der Schweißnaht (Stütze-Fußplatte)

Fußplatte: *Bl. 30x330x330*

Grenzwert Schweißnahtdicke:

$$a = 5\text{mm} \leq 0,7 * \text{mint} = 0,7 * 7\text{mm} = 4,9\text{mm}$$

$$\geq \sqrt{\text{maxt}} - 0,5 = \sqrt{30\text{mm}} - 0,5 = 5\text{mm}$$

Querschnittswerte des Linienquerschnitts des *HEA 220*: siehe 3.4.4.1

Tabelle 35: einwirkende Kräfte im Lager, berechnet mit [12]

Laststellung 1	Lager 1	Lager 2
F_z	41,22kN	0,06kN
F_y	-20,9kN	0,14kN
$F_x = N$	-237,41kN	-271,24kN
Laststellung 2		
F_z	40,83kN	0,48kN
F_y	24,18kN	-0,54kN
$F_x = N$	-174,66kN	-304,43kN
Laststellung 3		
F_z	41,53kN	0,45kN
F_y	-7,02kN	5,26kN
$F_x = N$	-693,86kN	-3,1kN
Laststellung 4		
F_z	41,74kN	0,15kN
F_y	75,69kN	-6,41kN
$F_x = N$	206,12kN	-862,69kN

Beanspruchung des Linienquerschnitts für LS4 - Lager 1:

$$\sigma_w = \frac{F_x}{A_w} = \frac{206,12kN}{57,1cm^2} = 3,61kN/cm^2$$

$$\tau_{w,y} = \tau_{\parallel,y} = \frac{F_y}{A_y} = \frac{75,69kN}{41,9cm^2} = 1,81kN/cm^2$$

$$\tau_{w,z} = \tau_{\parallel,z} = \frac{F_z}{A_z} = \frac{41,74kN}{15,2cm^2} = 2,75kN/cm^2$$

$$\sigma_{w,Ed} = \sqrt{\sigma_w^2 + \tau_{w,y}^2 + \tau_{w,z}^2} = \sqrt{(3,61kN/cm^2)^2 + (1,81kN/cm^2)^2 + (2,75kN/cm^2)^2}$$

$$\sigma_{w,Ed} = 4,9kN/cm^2$$

Nachweis: $\frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} = \frac{4,9kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,23 < 1,0$

Beanspruchung des Linienquerschnitts für LS4 - Lager 2:

$$\sigma_w = \frac{F_x}{A_w} = \frac{862,69kN}{57,1cm^2} = 15,11kN/cm^2$$

$$\tau_{w,y} = \tau_{\parallel,y} = \frac{F_y}{A_y} = \frac{6,41kN}{41,9cm^2} = 0,15kN/cm^2$$

$$\sigma_{w,Ed} = \sqrt{\sigma_w^2 + \tau_{w,y}^2} = \sqrt{(15,11kN/cm^2)^2 + (0,15kN/cm^2)^2} = 15,11kN/cm^2$$

Nachweis: $\frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} = \frac{15,11kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,73 < 1,0$

b) Nachweis der Fußplatte

Auflagerpressung: $\sigma_{c,Ed} = 0,79 \text{ kN/cm}$ je Breite $b = 1 \text{ cm}$

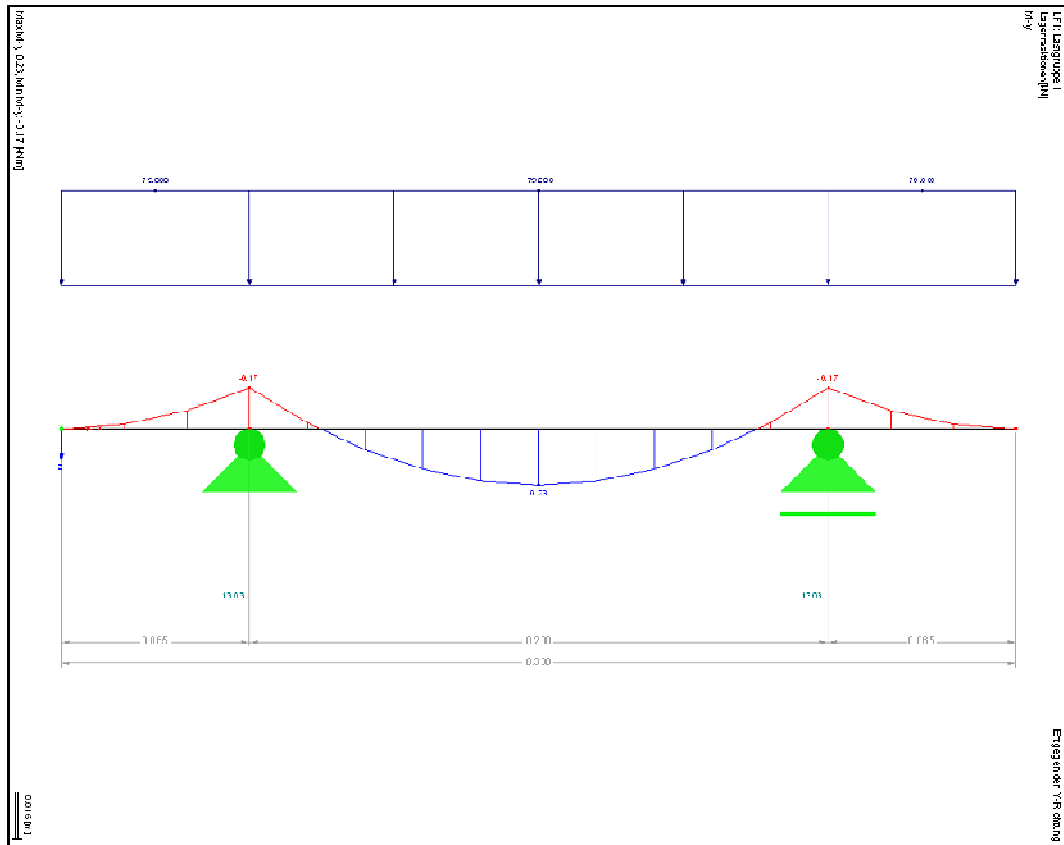


Abbildung 35: Biegemoment in der Fußplatte, Abbildung aus [12]

$$W_{FP} = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{(1 \text{ cm} \cdot 3,0 \text{ cm})^2}{6} = 1,5 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{FP} = \frac{\max M_{Ed}}{W_{FP}} = \frac{23,3 \text{ kNm}}{1,5 \text{ cm}^3} = 15,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{FP}}{\sigma_{Rd}} = \frac{15,5 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 0,66 < 1,0$$

5.4.4.3.2 Übertragung der Kräfte in das Fundament

a) Nachweis der Auflagerpressung

Annahme: gleichmäßig verteilte Druckspannung

$$\sigma_{c,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_{Platte}} = \frac{862,69kN}{33cm \cdot 33cm} = 0,79kN/cm^2$$

$$f_{cd} = 0,91kN/cm^2 \text{ für C16/20}$$

$$\frac{\sigma_c}{f_{cd}} = \frac{0,79kN/cm^2}{0,91kN/cm^2} = 0,87 < 1,0$$

b) Zugkraft

Rundstahlanker aus Betonstabstahl ($2 \times \varnothing 28mm$, BSt 500), welche vorher im Fundament eingelassen wurden.

$$\max F_{t,Ed} = 550,84kN$$

$$f_{y,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_s} = \frac{50kN/cm^2}{1,0} = 50kN/cm^2$$

(Außergewöhnliche Bemessungssituation)

$$A_{S,\varnothing 28mm} = 6,16cm^2$$

$$f_{y,Ed} = \frac{F_{t,Ed}}{A_S} = \frac{550,84kN}{2 \cdot 6,16cm^2} = 44,7kN/cm^2$$

Nachweis:

$$\frac{f_{y,Ed}}{f_{y,Rd}} = \frac{44,7kN/cm^2}{50kN/cm^2} = 0,89 < 1,0$$

c) Querkraft

Schubdübel: HEB 140

c₁) Nachweis der Schweißnaht Schubdübel-Fußplatte

Grenzwert Schweißnahtdicke:

$$a = 5mm \leq 0,7 \cdot \min t = 0,7 \cdot 7mm = 4,9mm$$

$$\geq \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{30mm} - 0,5 = 5mm$$

Querschnittswerte des Linienquerschnitts des HEB 140:

$$a = 0,5cm, h = 14cm, b = 14cm, t_f = 1,2cm, t_w = 0,7cm, r = 1,2cm, d = 9,2cm$$

Die Nähte im Bereich der Ausrundung werden nicht mit angesetzt.

$$A_{w,Gurt} = A_y = 2 * a * (2 * b + 2 * t_f - 2 * r - t_w) \\ = 2 * 0,5cm * (2 * 14cm + 2 * 1,2cm - 2 * 1,2cm - 0,7cm) = 29,6cm^2$$

$$A_{w,Steg} = A_z = 2 * a * d = 2 * 0,5cm * 9,2cm = 9,2cm^2$$

$$I_y = \frac{1}{2} * a * b * h^2 + \frac{1}{2} * a * (b - 2r - t_w) * (h - 2 * t_f)^2 + \frac{1}{6} * a * d^3 + a * t_f * (h - t_f)^2 \\ = \frac{1}{2} * 0,5cm * 14cm * (14cm)^2 + \frac{1}{2} * 0,5cm * (14cm - 2 * 1,2cm - 0,7cm) \\ * (14cm - 2 * 1,2cm)^2 + \frac{1}{6} * 0,5cm * (9,2cm)^3 + 0,5cm * 1,2cm * (14cm - 1,2cm)^2$$

$$I_y = 1216cm^4$$

$$I_z = \frac{1}{3} * a * b^3 - \frac{1}{6} * a * (2 * r + t_w)^3 + a * t_f * b^2 \\ = \frac{1}{3} * 0,5cm * (14cm)^3 - \frac{1}{6} * 0,5cm * (2 * 1,2cm + 0,7cm)^3 + 0,5cm * 1,2cm * (14cm)^2$$

$$I_z = 572,5cm^4$$

Einwirkende Schnittkräfte: $F_y = V_y = 75,69kN$

$$F_z = V_z = 41,74kN$$

$$M_{y,Ed} = F_z * e = 41,74kN * 11cm = 459,1kNcm$$

$$M_{z,Ed} = F_y * e = 75,69kN * 11cm = 832,6kNcm$$

->Zusätzliches Moment aus dem Außermittigen Anschluss des Bremsverbandes (Stab 8):

$$M_{y,Bv,Ed} = (74,53kN * \cos 57^\circ) * 22,5cm = 913,3kNcm$$

Beanspruchung des Linienquerschnitts:

$$\sigma_w = \frac{M_{y,Ed} + M_{y,Bv,Ed}}{I_y} * z + \frac{M_{z,Ed}}{I_z} * y = \frac{459,1kNcm + 913,3kNcm}{1216cm^4} * 7cm + \frac{832,6kNcm}{572,5cm^4} * 7cm = 18,1kN/cm^2$$

$$\tau_{w,y} = \tau_{\parallel} = \frac{V_y}{A_y} = \frac{75,69kN}{29,6cm^2} = 2,56kN/cm^2$$

$$\tau_{w,z} = \tau_{\parallel} = \frac{V_z}{A_z} = \frac{41,74kN}{9,2cm^2} = 4,54kN/cm^2$$

$$\sigma_{w,Ed} = \sqrt{\sigma_w^2 + \tau_{w,y}^2 + \tau_{w,z}^2} = \sqrt{(18,1kN/cm^2)^2 + (2,56kN/cm^2)^2 + (4,54kN/cm^2)^2}$$

$$\sigma_{w,Ed} = 18,82kN/cm^2$$

Nachweis: $\frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} = \frac{18,82kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,9 < 1,0$

c₂) Nachweis des Schubdübels als Kragträger

Querschnittswerte HEB 140: $W_y = 216\text{cm}^3$, $W_z = 78,5\text{cm}^3$

$$A_{Steg} = d * t_w = 9,2\text{cm} * 0,7\text{cm} = 6,44\text{cm}^2$$

$$A_{Gurt} = 2 * b * t_f = 2 * 14\text{cm} * 1,2\text{cm} = 33,6\text{cm}^2$$

Einwirkende Schnittkräfte: $M_{y,Ed} = (459,1\text{kNcm} + 913,3\text{kNcm}) = 1372,4\text{kNcm}$

$$M_{z,Ed} = 832,6\text{kNcm}$$

Nachweis:

$$\sigma_{y,Ed} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{1372,4\text{kNcm}}{216\text{cm}^3} = 6,35\text{kN/cm}^2$$

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{832,6\text{kNcm}}{78,5\text{cm}^3} = 10,61\text{kN/cm}^2$$

$$\tau = \frac{F_y}{A_{Gurt}} + \frac{F_z}{A_{Steg}} = \frac{75,69\text{kN}}{33,6\text{cm}^2} + \frac{41,74\text{kN}}{6,44\text{cm}^2} = 8,73\text{kN/cm}^2$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{y,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 + 3 * \tau^2} = \sqrt{(6,35\text{kN/cm}^2)^2 + (10,61\text{kN/cm}^2)^2 + 3 * (8,73\text{kN/cm}^2)^2}$$

$$\sigma_V = 19,53\text{kN/cm}^2$$

Nachweis: $\frac{\sigma_V}{\sigma_{Rd}} = \frac{19,53\text{kN/cm}^2}{23,5\text{kN/cm}^2} = 0,83 \leq 1,0$

c₃) Nachweis der Betonpressung

$$\sigma_c = \frac{V_{Ed}}{l_c * b_{eff}} = \frac{75,69\text{kN}}{18\text{cm} * 9,1\text{cm}} = 0,46\text{kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = 0,907\text{kN/cm}^2 \text{ für C16/20}$$

$$\frac{\sigma_c}{f_{cd}} = \frac{0,46\text{kN/cm}^2}{0,907\text{kN/cm}^2} = 0,51 < 1,0$$

5.5 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

-Teilsicherheitsbeiwert: $\gamma_{Q,ser} = 1,0$

-Schwingbeiwerte müssen nicht berücksichtigt werden

-Einwirkungskombination GZG:

$$EK_{GZG} = 1,0 * (Eigengewicht KBT + Eigengewicht Stütze) \\ + \gamma_{Q,ser} * (Eigengewicht Kranbrücke + Hublast + Spurführungskräfte)$$

zu b) Horizontale Verschiebung δ_y einer Stütze in Höhe der Kranauflagerung

$$vorh \delta_y = 23,2mm$$

$$HC3: \text{grenz } \delta_y = \frac{h_c}{350} = \frac{8500mm}{350} = 24,3cm$$

$$\text{Nachweis: } vorh \delta_y < \text{grenz } \delta_y$$

zu c) Differenz $\Delta\delta_y$ der horizontalen Verschiebungen benachbarter Stützen

$$vorh \Delta\delta_y = 0,9cm < \text{grenz} \Delta\delta_y = \frac{L}{600} = \frac{600cm}{600} = 1cm$$

6 Nachweis und Bemessung des Bremsverbandes

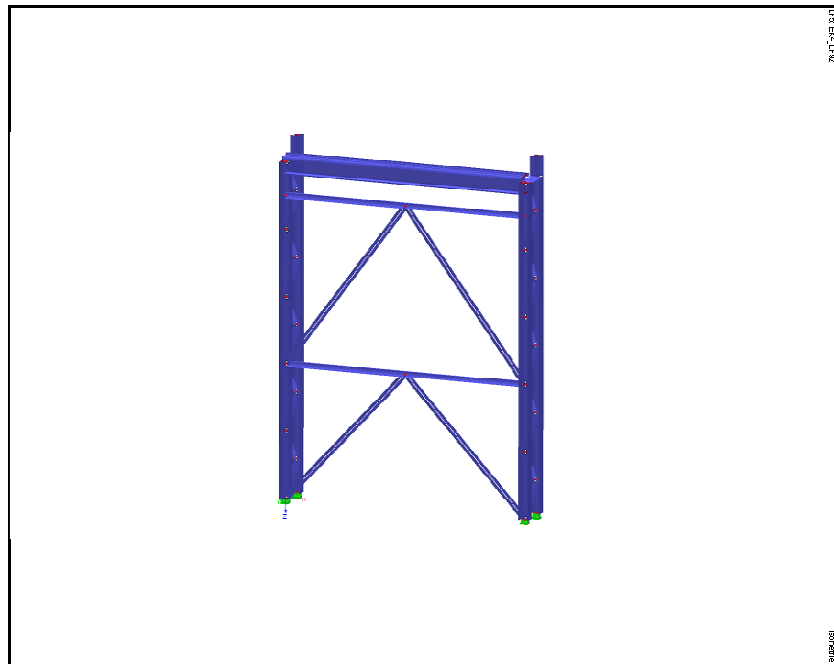


Abbildung 36: grafische Darstellung des Bremsverbandes, Abbildung aus [12]

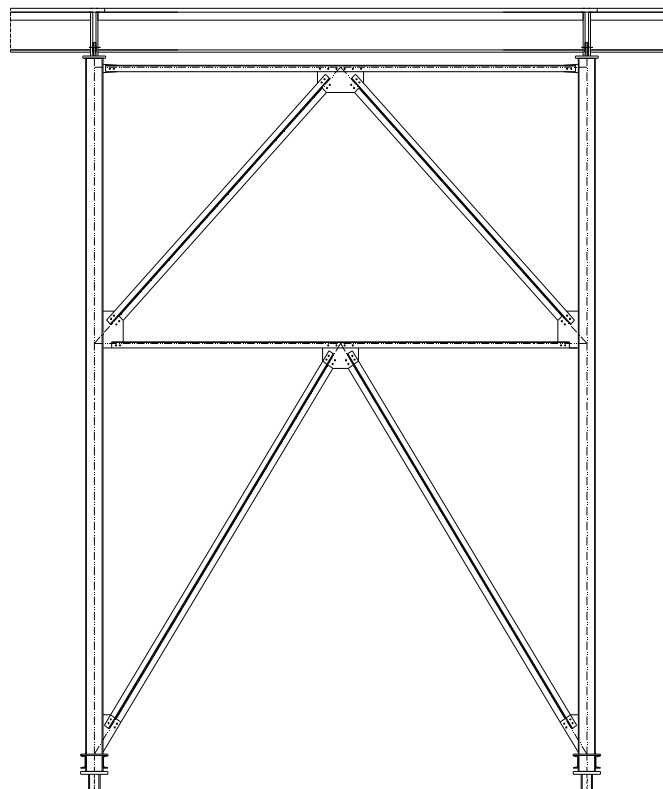


Abbildung 37: grafische Darstellung des Bremsverbandes, eigene Zeichnung mit [14]

Tabelle 36: Schnittkräfte der Stäbe im Bremsverband, berechnet mit [12]

Stabnummer	LS1	LS2	LS3	LS4	min/max
1	47,11kN	46,30kN	45,52kN	46,39kN	47,11kN
2	-38,14kN	-32,09kN	-40,61kN	-41,47kN	-41,47kN
3	44,22kN	43,97kN	39,14kN	38,93kN	43,97kN
4	-34,62kN	-35,06kN	-39,21kN	-39,05kN	-39,21kN
5	-57,11kN	-56,48kN	-61,99kN	-63,21kN	-63,21kN
6	56,91kN	56,3kN	61,86kN	63,15kN	63,15kN
7	-74,34kN	-74,5kN	-73,93kN	-73,51kN	-74,5kN
8	74,29kN	74,53kN	73,81kN	73,54kN	74,53kN

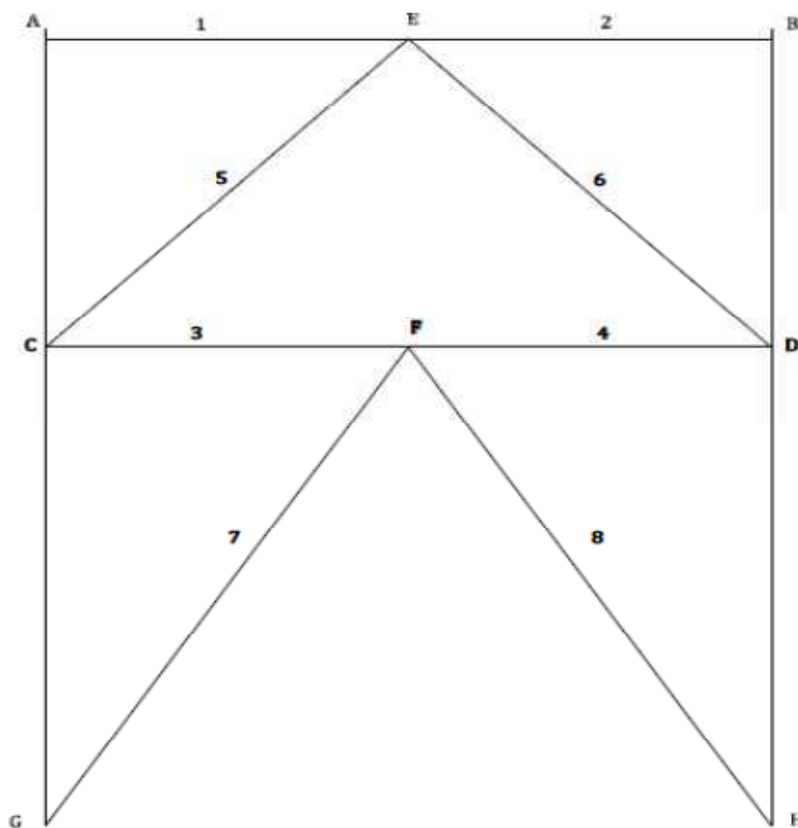


Abbildung 38: Nummerierung der Stäbe und Knoten im Bremsverband, eigene Zeichnung mit [14]

6.1 Querschnittsnachweis der Verbandstäbe

6.1.1 Zugbeanspruchung

(es wird nur ein Winkel betrachtet)

$$F_{8,Ed} = N_{Ed} = 74,53 \text{ kN} \text{ (maximale Zugkraft)}$$

$$N_{t,Rd} = N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 * A_{net} * f_u}{\gamma_{M2}}$$

Dabei ist: β_2 Abminderungsbeiwert für zwei Schrauben im Stab

A_{net} Nettoquerschnittsfläche des Zugstabes

f_u Nennwert der Zugfestigkeit

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Tabelle 37: Abminderungsbeiwerte β_2 und β_3 , EC3-1-8, Tab. 3.8, siehe [6], Kap. 3.10.3

Lochabstand	p_1	$\leq 2,5 d_0$	$\geq 5,0 d_0$
2 Schrauben	β_2	0,4	0,7
3 Schrauben oder mehr	β_3	0,5	0,7

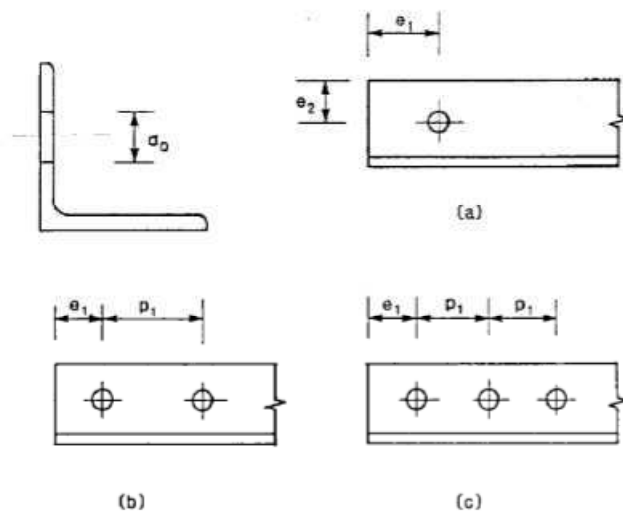


Abbildung 39: einseitig angeschlossener Winkel, EC3-1-8, Bild 3.9, siehe [6], Kap. 3.10.3

Legende

- a) 1 Schraube
- b) 2 Schrauben
- c) 3 Schrauben

Für Zwischenwerte von p_1 darf der Wert β interpoliert werden.

$$2,5 * d_0 = 32,5 \text{ mm} \leq p_1 = 50 \text{ mm} \leq 5,0 * d_0 = 65 \text{ mm}$$

$$\rightarrow \beta_2 = 0,56 (\text{interpoliert})$$

$$f_u = 36,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{net} = A - t * d_0 = 9,4 \text{ cm}^2 - 0,7 \text{ cm} * 1,3 \text{ cm} = 8,49 \text{ cm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 * A_{net} * f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,56 * 8,49 \text{ cm}^2 * 36,0 \text{ kN/cm}^2}{1,25} = 142,6 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{74,53 \text{ kN}}{142,6 \text{ kN}} = 0,52 \leq 1,0$$

6.1.2 Druckbeanspruchung

$$F_{7,Ed} = N_{Ed} = 74,5kN \text{ (maximale Druckkraft)}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{18,8cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1,0} = 441,8kN$$

Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{74,5kN}{441,8kN} = 0,17 \leq 1,0$$

6.2 Stabilitätsnachweise der Verbandstäbe

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

6.2.1 Verbandstab 2

$$\max N_{Ed} = 41,47kN \text{ (maximale Druckkraft, } L = 3,0m)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\text{mit: } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L^2} = \frac{\pi^2 * 21000kN/cm^2 * 84,8cm^4}{(300cm)^2} = 195kN$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{18,8cm^2 * 23,5kN/cm^2}{195kN}} = 1,51$$

$$\text{mit: } \phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\alpha = 0,49 \text{ für Knicklinie c (siehe Anhang 2)}$$

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (1,51 - 0,2) + 1,51^2] = 1,96$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,96 + \sqrt{1,96^2 - 1,51^2}} = 0,31 \leq 1,0$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,31 * 18,8cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1,0} = 137,6kN$$

-Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{41,47kN}{137,6kN} = 0,3 \leq 1,0$$

6.2.2 Verbandstab 5

$\max N_{Ed} = 63,21kN$ (maximale Druckkraft, $L = 4,34m$)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\text{mit: } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2} = \frac{\pi^2 * 21000kN/cm^2 * 199,5cm^4}{(434cm)^2} = 219,5kN$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{18,8cm^2 * 23,5kN/cm^2}{219,5kN}} = 1,42$$

$$\text{mit: } \phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$\alpha = 0,49$ für Knicklinie c (siehe Anhang 2)

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (1,42 - 0,2) + 1,42^2] = 1,81$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,81 + \sqrt{1,81^2 - 1,42^2}} = 0,34 \leq 1,0$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,34 * 18,8cm^2 * 23,5kN/cm^2}{1,0} = 150,2kN$$

-Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{63,21kN}{150,2kN} = 0,42 \leq 1,0$$

6.2.3 Verbandstab 7

$\max N_{Ed} = 74,5kN$ (maximale Druckkraft, $L = 5,14m$)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\text{mit: } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2} = \frac{\pi^2 * 21000kN/cm^2 * 199,5cm^4}{(514cm)^2} = 156,5kN$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{18,8cm^2 * 23,5kN/cm^2}{156,5kN}} = 1,68$$

$$\text{mit: } \phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$\alpha = 0,49$ für Knicklinie c (siehe Anhang 2)

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (1,68 - 0,2) + 1,68^2] = 2,27$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{2,27 + \sqrt{2,27^2 - 1,68^2}} = 0,26 \leq 1,0$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,26 * 18,8 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 116,4 \text{ kN}$$

-Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{74,5 \text{ kN}}{116,4 \text{ kN}} = 0,64 \leq 1,0$$

6.3 Einzelnachweise

6.3.1 Nachweis Knoten A

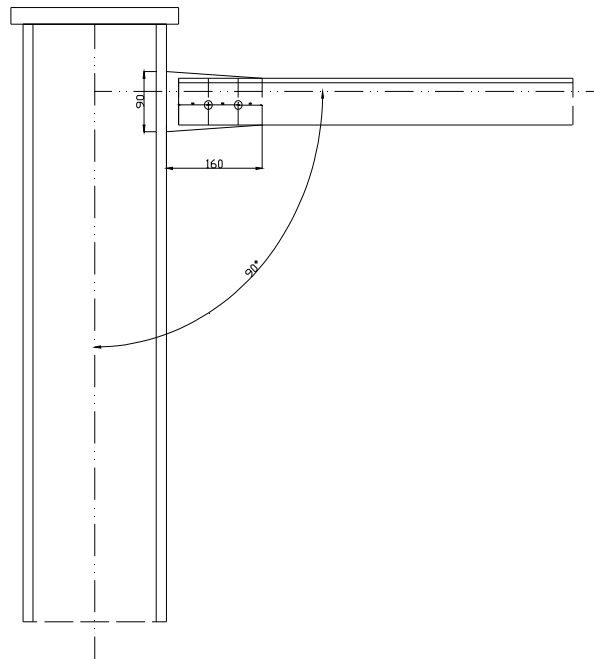


Abbildung 40: grafische Darstellung des Knoten A, eigene Zeichnung mit [14]

6.3.1.1 Nachweis der Schweißnaht des Knotenblechs BL 10x90x160

Schnittgrößen an der Schweißnaht:

$$F_{1,Ed} = F_{v,Ed} = 47,11kN$$

Grenzwert Schweißnahtdicke: umlaufende Kehlnaht

$$\begin{aligned} a = 5mm & \leq 0,7 * mint = 0,7 * 10mm = 7mm \\ & \geq \sqrt{maxt} - 0,5 = \sqrt{17mm} - 0,5 = 3,6mm \end{aligned}$$

Schweißnahtfläche: $A_w = a * l_w = 0,5cm * 2 * 9cm = 9cm^2$

Spannung in der Schweißnaht:

$$\sigma_w = \frac{F_{1,Ed}}{A_w} = \frac{47,11kN}{9cm^2} = 5,23kN/cm^2$$

Nachweis: $\frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} = \frac{5,23kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,25 < 1,0$

6.3.1.2 Nachweis des Knotenblech auf Herausreißen (Blockversagen von Schraubengruppen)

Annahme: exzentrische Belastung

Nachweisformel: $\frac{N_{Ed}}{V_{eff,2,Rd}} \leq 1,0$

Dabei ist: $N_{Ed} = F_{R,Ed} = 80kN$

$$F_{\perp,Ed} = \frac{M}{e_2} = \frac{F_{v,Ed} * (w - e)}{e_2} = \frac{74,11kN * (4cm - 1,97cm)}{5cm} = 30,1kN$$

$$F_{R,Ed} = \sqrt{F_{\perp,Ed}^2 + F_{v,Ed}^2} = \sqrt{(30,1kN)^2 + (74,11kN)^2} = 80kN$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 * f_u * \frac{A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y}{\sqrt{3}} * \frac{A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

dabei ist: A_{nt} die zugbeanspruchte Netto-Querschnittsfläche

A_{nv} die schubbeanspruchte Netto-Querschnittsfläche

mit: $A_{nt} = d_0 * t = 1,3cm * 1cm = 1,3cm^2$

$$A_{nv} = 2 * t * (e_1 + p_1) = 2 * 1cm * (4cm + 5cm) = 18cm^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 * 36kN/cm^2 * \frac{1,3cm^2}{1,25} + \frac{23,5kN/cm^2}{\sqrt{3}} * \frac{18cm^2}{1,0} = 263kN$$

Nachweis: $\frac{N_{Ed}}{V_{eff,1,Rd}} = \frac{80kN}{263kN} = 0,3 \leq 1,0$

6.3.2 Nachweis Knoten H

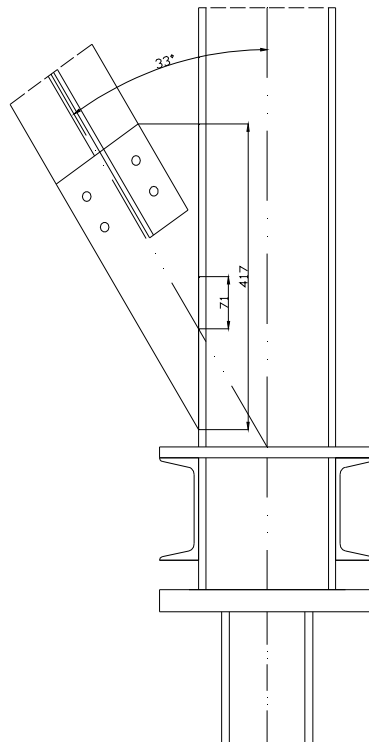


Abbildung 41: grafische Darstellung des Knoten H, eigene Zeichnung mit [14]

6.3.2.1 Nachweis der Schweißnaht des Knotenblechs *Bl. 10x218x417*

Schnittgrößen an der Schweißnaht:

$$F_{8,Ed} = 74,53 \text{ kN}$$

$$F_{\perp} = 74,53 \text{ kN} * \sin 33^{\circ} = 40,6 \text{ kN}$$

$$F_{\parallel} = 74,53 \text{ kN} * \cos 33^{\circ} = 62,5 \text{ kN}$$

$$M_w = M_y = F_{\perp} * e = 40,6 \text{ kN} * 7,1 \text{ cm} = 288,3 \text{ kNcm}$$

Grenzwert Schweißnahtdicke: umlaufende Kehlnaht

$$a = 4 \text{ mm} \leq 0,7 * \text{mint} = 0,7 * 7 \text{ mm} = 4,9 \text{ mm}$$

$$\geq \sqrt{\text{maxt}} - 0,5 = \sqrt{10 \text{ mm}} - 0,5 = 2,7 \text{ mm}$$

Querschnittswerte der Schweißnaht: $A_w = a * l_w = 0,4 \text{ cm} * 2 * 45,7 \text{ cm} = 36,6 \text{ cm}^2$

$$W_w = 2 * a * \frac{l^2}{6} = 2 * 0,4 \text{ cm} * \frac{(45,7 \text{ cm})^2}{6} = 278,5 \text{ cm}^3$$

Spannung in der Schweißnaht:

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{\perp}}{A_w} + \frac{M_w}{W_w} = \frac{40,6 \text{ kN}}{36,6 \text{ cm}^2} + \frac{288,3 \text{ kNcm}}{278,5 \text{ cm}^3} = 2,14 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{\parallel}}{A_w} = \frac{62,5 \text{ kN}}{36,6 \text{ cm}^2} = 1,71 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{w,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2} = \sqrt{(2,14kN/cm^2)^2 + (1,71kN/cm^2)^2} = 2,74kN/cm^2$$

Nachweis: $\frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{v,w,d}} = \frac{2,74kN/cm^2}{20,8kN/cm^2} = 0,13 < 1,0$

6.3.2.2 Nachweis des Knotenblechs neben der Naht

Querschnittswerte des Rechteckquerschnitts: $A = t * h = 1,0cm * 41,7cm = 47,2cm^2$

$$W_y = t * \frac{h^2}{6} = 1,0cm * \frac{(41,7cm)^2}{6} = 289,8cm^3$$

Spannung im Knotenblech:

$$\sigma = \frac{F_{\perp}}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{40,6kN}{47,2cm^2} + \frac{288,3kNcm}{289,8cm^3} = 1,85kN/cm^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{\parallel}}{A} = \frac{62,5kN}{47,2cm^2} = 1,32kN/cm^2$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * \tau_{\parallel}^2} = \sqrt{(1,85kN/cm^2)^2 + 3 * (1,32kN/cm^2)^2} = 2,94kN/cm^2$$

Nachweis: $\frac{\sigma_V}{\sigma_{Rd}} = \frac{2,94kN/cm^2}{23,5kN/cm^2} = 0,13 < 1,0$

6.3.2.3 Nachweis der Schraubenverbindung

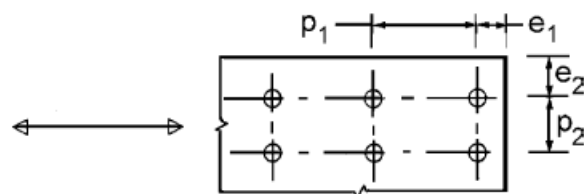


Abbildung 42: Bezeichnungen der Lochabstände, EC3-1-8, Bild 3.1, siehe [6], Kap. 3.5

Lochabstände: $p_1 = 3,75 * d_0 = 3,75 * 12mm = 45mm$

gewählt: $p_1 = 50mm$

$$e_1 = 3 * d_0 = 3 * 12mm = 36mm$$

gewählt: $e_1 = 40mm$

$$e_2 = 30mm \text{ bzw. } w = 40mm \text{ nach DIN 998 festgelegt}$$

a) Bestimmung und Nachweis der Grenzabscherkraft nach DIN EN 1993-1-8

gewählte Schraube:

2xM12 8.8 je Stab; Schaft in der Scherfuge; Kategorie C der Schraubenverbindung

Nachweisformel: $\frac{F_{v,Ed}}{n \cdot F_{v,Rd}} \leq 1,0$

Dabei ist: $F_{v,Ed} = 74,53kN$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

mit: $\alpha_v = 0,6$ für Festigkeitsklasse 8.8 und Schaft in der Scherfuge

$$f_{ub} = 80kN/cm^2$$

$$A = 1,13cm^2 \quad \text{Schaftquerschnittsfläche der Schraube}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot 80kN/cm^2 \cdot 1,13cm^2}{1,25} = 43,4kN$$

Nachweis: $\frac{74,53kN}{2 \cdot 43,4kN} = 0,86 \leq 1,0$

Da die Kraft auf der Linie der Symmetrieachse angreift und nicht auf der Linie der Schraubenachse, entsteht eine zusätzliche Kraft $F_{\perp,Ed}$. Aus den beiden Kräften $F_{\perp,Ed}$ und $F_{v,Ed}$ wird die daraus resultierende Kraft $F_{R,Ed}$ bestimmt und damit die Bemessung durchgeführt.

$$F_{\perp,Ed} = \frac{M}{e_2} = \frac{F_{v,Ed} \cdot (w - e)}{e_2} = \frac{74,53kN \cdot (4cm - 1,97cm)}{5cm} = 30,3kN$$

$$F_{R,Ed} = \sqrt{F_{\perp,Ed}^2 + F_{v,Ed}^2} = \sqrt{(30,3kN)^2 + (74,53kN)^2} = 80,5kN$$

Nachweis: $\frac{F_{R,Ed}}{n \cdot F_{v,Rd}} = \frac{80,5kN}{2 \cdot 43,4kN} = 0,93 \leq 1,0$

b) Bestimmung und Nachweis der Grenzlochleibungskraft

Nachweisformel: $\frac{F_{R,Ed}}{n \cdot F_{b,Rd}} \leq 1,0$

Dabei ist: $F_{R,Ed} = 80,5kN$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

mit: $k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{30mm}{12mm} - 1,7 = 5,3 \\ 2,5 \end{array} \right.$

$$k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \alpha_d = 1,11 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = 2,22 \\ 1,0 \end{array} \right.$$

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{40mm}{3 \cdot 12mm} = 1,11 \quad (\text{Randschrauben})$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{50mm}{3 \cdot 12mm} - \frac{1}{4} = 1,39 \quad (\text{Innenschrauben})$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80kN/cm^2}{36kN/cm^2} = 2,22$$

$$\alpha_b = 1,0$$

$$d = 12mm$$

$$t = 7mm$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 36kN/cm^2 \cdot 1,2cm \cdot 0,7cm}{1,25} = 60,5kN$$

Nachweis: $\frac{F_{R,Ed}}{n \cdot F_{b,Rd}} = \frac{80,5kN}{2 \cdot 60,5kN} = 0,67 \leq 1,0$

6.3.2.4 Nachweis des Knotenblech auf Herausreißen (Blockversagen von Schraubengruppen)

Annahme: zentrische Belastung

Nachweisformel: $\frac{N_{Ed}}{V_{eff,1,Rd}} \leq 1,0$

Dabei ist: $N_{Ed} = 74,53kN$

$$V_{eff,1,Rd} = f_u * \frac{A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y}{\sqrt{3}} * \frac{A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

mit: $A_{nt} = d_0 * t = 1,2cm * 1cm = 1,2cm^2$

$$A_{nv} = 2 * t * (e_1 + p_1) = 2 * 1cm * (4cm + 5cm) = 18cm^2$$

$$V_{eff,1,Rd} = 36kN/cm^2 * \frac{1,2cm^2}{1,25} + \frac{\frac{23,5kN}{cm^2}}{\sqrt{3}} * \frac{18cm^2}{1,0} = 278,8kN$$

Nachweis: $\frac{N_{Ed}}{V_{eff,1,Rd}} = \frac{74,53kN}{278,8kN} = 0,27 \leq 1,0$

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Krananlage, welche als komplette Stahlkonstruktion gefertigt werden soll, nach dem Berechnungsmodell des Eurocode nachgewiesen, konstruiert und unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit optimiert. Dabei musste, unter Berücksichtigung der Vorgaben des Bauherrn, die Konstruktion so geplant werden, dass die bestehende Konservierungshalle ohne größere Veränderungen genutzt werden kann und somit die Arbeitsfläche weiterhin optimal zur Verfügung steht. Die beiden neuen Brückenlaufkrane, mit einer Traglast von jeweils 20 t, können sowohl im Einzel- aber auch im Tandembetrieb, die immer größer und schwerer ausfallenden Bauteile, speziell im Bereich des Brückenbaus, besser und wirtschaftlicher transportieren.

Die Kranbahnträger wurden als winkerverstärkte Walzprofile ausgebildet. Dabei erwiesen sich die Winkel in zweierlei Hinsicht als günstig. Aufgrund der entstehenden U-Form des Obergurts erhöht sich zum Einen die Quersteifigkeit des Obergurts und zum Anderen verschiebt sich der Schubmittelpunkt. Dies hat zur Folge, dass das Torsionsmoment der Horizontallast, bezogen auf den Schubmittelpunkt, kleiner wird.

Die Stützen der Unterkonstruktion wurden als Fachwerkstützen ausgebildet, wobei zwei gegenüberliegende HEA-Profile, durch dachförmig in den Steg eingeschweißte Winkel, eine ausreichende Steifigkeit quer zur Kranfahrtrichtung gewährleisten und somit die vorgegebenen Toleranzen eingehalten werden können. Hierbei war der Gebrauchstauglichkeitsnachweis aufgrund der Länge der Stützen und den auftretenden Horizontallasten eher maßgebend, als der Nachweis der Tragsicherheit. Die Lagerung der Stützen wurde als gelenkig angesehen. Dementsprechend werden die auftretenden Kräfte über die Fußplatte, den Schubdübel und die eingelassenen Zuganker in das Fundament eingeleitet.

Als Bremsverband in Kranbahnlängsrichtung dienen pro Kranbahnachse jeweils zwei K-Verbindungen aus Winkelprofilen, welche bei kleinsten Verformungen ansprechen und somit ein weiteres Verbiegen von Teilen der Krananlage verhindern. Dies ist im Wesentlichen maßgeblich für den verschleißarmen Betrieb und senkt somit auch die Instandhaltungskosten auf lange Sicht.

8 Literaturverzeichnis / Quellen

8.1 Normen

- [1] DIN EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Ausgabe 12/2010 (samt zugehörigem Nationalen Anhang)
- [2] DIN EN 1090-2 Eurocode: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken; Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Ausgabe 12/2008
- [3] DIN EN 1991-3 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke; Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen; Ausgabe 03/2007 (samt zugehörigem Nationalen Anhang)
- [4] DIN EN 1993-1-1 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Ausgabe 12/2010 (samt zugehörigem Nationalen Anhang)
- [5] DIN EN 1993-1-5 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Ausgabe 12/2010 (samt zugehörigem Nationalen Anhang)
- [6] DIN EN 1993-1-8 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Ausgabe 12/2010 (samt zugehörigem Nationalen Anhang)
- [7] DIN EN 1993-1-9 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 1-9: Ermüdung; Ausgabe 12/2010 (samt zugehörigem Nationalen Anhang)
- [8] DIN EN 1993-6 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 6: Kranbahnen; Ausgabe 12/2010 (samt zugehörigem Nationalen Anhang)

8.2 Literatur

- [9] Seeßelberg C.: Kranbahnen- Bemessung und konstruktive Gestaltung; 3. aktualisierte und erweiterte Auflage, Bauwerk Verlag; Berlin 2009
- [10] Wagenknecht, G.: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3; Band 1 Tragwerksplanung - Grundlagen; 4. vollständig überarbeitete Auflage, Beuth Verlag; Berlin 2011
- [11] Wagenknecht, G.: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3; Band 2 Verbindungen und Konstruktionen; 3. vollständig überarbeitete Auflage, Beuth Verlag; Berlin 2011

8.3 Software

- [12] RSTAB Version 7; Ingenieur-Software Dlubal GmbH; Tiefenbach 2009; www.dlubal.de (Zusatzmodul Kranbahn – Programm zur Berechnung von Kranbahnträgern)
- [13] DUENQ Version 7.01; Ingenieur-Software Dlubal GmbH; Tiefenbach 2009; www.dlubal.de
- [14] AutoCAD 2008; Autodesk; www.autodesk.de
- [15] Microsoft Office 2007 (Textverarbeitung, Tabellenkalkulation)

9 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Roßwein,

Marcus Gäbler